

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

LES TENDANCES DE LA VARIABILITÉ DES TEMPÉRATURES
AU QUÉBEC AU XX^e SIÈCLE

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
MYRIAM MONTPETIT

OCTOBRE 2000

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
RÉSUMÉ	ix
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I.....	4
GÉNÉRALITÉS	4
1.1 Terminologies.....	4
1.1.1 La variabilité	4
1.1.2 Le climat.....	5
1.1.3 La température	5
1.1.4 La variabilité du climat.....	6
1.1.5 La variabilité des températures.....	6
1.2 État des connaissances.....	8
1.2.1 Le climat au Québec	8
1.2.2 L'humain et le climat.....	9
1.2.2.1 L'augmentation de la population mondiale et de la pollution	9
1.2.2.2 Le réchauffement de la température à l'échelle globale	11
1.2.3 La variabilité des températures dans le monde et au Québec.....	12
CHAPITRE II.....	13
L'IMPORTANCE D'ÉTUDIER LA VARIABILITÉ DES TEMPÉRATURES AU QUÉBEC.....	13
2.1 Aspects sociaux	13
2.1.1 Le petit âge glaciaire.....	13
2.1.2 Effets anticipés d'un réchauffement plus prononcé et d'un accroissement de la variabilité sur la santé humaine	14
2.2 Aspects économiques.....	15
2.3 Aspects environnementaux	17
2.4 Les prévisions futures	19

CHAPITRE III	22
LA MESURE	22
3.1 Histoire de la mesure de la température	22
3.2 Les relevés de la température au Canada	23
3.3 La technique d'homogénéisation canadienne	24
3.4 La répartition géographique des stations au Québec	26
3.5 Les données	27
CHAPITRE IV	31
DÉMARCHE ANALYTIQUE	31
4.1 Rappel de l'objectif et des hypothèses de la recherche	31
4.2 Les influences géographiques	32
4.3 Division de la province du Québec en quatre zones géographiques	32
4.4 Établissement de trois périodes distinctes.....	35
4.5 Reconstitution des séries chronologiques avec la plus ancienne station de chacune des zones	36
4.6 Calcul de la variabilité inter annuelle (saisonnière), et inter mensuelle	39
4.6.1 La moyenne mobile.....	39
4.6.2 L'écart-type mobile.....	40
4.7 Méthodes de validation des hypothèses	42
CHAPITRE V	44
LE RÉCHAUFFEMENT QU'A CONNU LE QUÉBEC AU XX ^e SIÈCLE A-T-IL RENDU LES TEMPÉRATURES PLUS VARIABLES ?	44
5.1 Observations générales de la courbe d'oscillations des températures moyennes annuelles des 22 stations de la province de Québec, de 1916 à 1995.....	44
5.2 Vérification partielle de l'objectif de la recherche.....	46
5.3 Validation de la première hypothèse	47
5.4 Validation de la troisième hypothèse.....	48
5.5 Validation complète de l'objectif principal et de la deuxième hypothèse	48

5.6 Détermination de l'objectif principal et des hypothèses de la recherche à travers les saisons	55
DISCUSSION	60
CONCLUSION	64
RÉFÉRENCES	67
APPENDICE A	71
EXEMPLE DE GRILLE DE CALCULS	71
APPENDICE B	74
FIGURE ET TABLEAU COMPLÉMENTAIRES	74

LISTE DES FIGURES

Figure

- 3.1 Carte des 22 stations météorologiques du Québec où les relevés de la température maximale et minimale moyenne mensuelle ont été homogénéisés
- 4.1 Carte des divisions géographiques du Québec
- 5.1 Températures moyennes annuelles des 22 stations de la province de Québec de 1916 à 1995
- 5.2 Moyenne mobile et écart-type mobile inter annuel normalisés à zéro des 22 stations de la province de Québec, de 1916 à 1995
- 5.3 Moyenne mobile et écart-type mobile inter mensuel normalisés à zéro de la province de Québec, de 1916 à 1995
- 5.4 Températures moyennes annuelles reconstituées à chaque zone géographique
- 5.5 Moyenne mobile des températures moyennes annuelles saisonnières normalisées à zéro des 22 stations de la province de Québec, de 1916 à 1995
- 5.6 Écart-type mobile des températures moyennes annuelles saisonnières normalisées à zéro des 22 stations de la province de Québec, de 1916 à 1995

LISTE DES TABLEAUX

Tableau

- 3.1 Emplacement géographique, périodicité et numéro d'identification des stations météorologiques
- 3.2 Multiplicité et étalement temporel des dates d'édification des stations météorologiques et de leur nombre.
- 4.1 Délimitation latitudinale et longitudinale des zones géographiques
- 4.2 Équations des droites de régression dérivées des corrélations effectuées entre les séries chronologiques des stations de base et des stations de référence à chacune des zones géographiques
- 5.1 Coefficient de corrélation de Pearson et seuil d'acceptation entre la moyenne mobile et l'écart-type mobile inter annuel et inter mensuel, à chacune des zones géographiques
- 5.2 Analyse de la variabilité inter annuelle et inter mensuelle à chacune des zones géographiques au cours des trois périodes à l'étude
- 5.3 Corrélation entre la moyenne mobile et l'écart-type mobile inter annuel saisonnier à chacune des zones géographiques
- 5.4 Températures et écarts-types moyens annuels saisonniers périodiques à chacune des zones géographiques

REMERCIEMENTS

Cette étude a été rendue possible grâce à la participation et la collaboration d'une équipe multidisciplinaire. D'abord, je tiens à remercier mon directeur de recherche, Monsieur Peter Zwack, Docteur en météorologie à l'UQAM, de m'avoir proposé ce sujet d'actualité d'importance capitale au niveau sociétal pour les générations présentes et futures, et surtout très controversé car encore mal connu et peu étudié. Grâce à son expertise et son suivi, il a su me faire partager sa passion pour ce sujet. Par simple observation, il m'a appris à lire et à décoder les tendances "cachées", derrière chacune des courbes d'oscillations de la température. Au fil de nos rencontres, les informations qui semblaient à priori illisibles, banales, et incompréhensibles, ont pris un sens, aussi grâce aux techniques qu'il m'a enseigné pour les rendre visuellement compréhensible.

Je remercie aussi Lucie Vincent, mathématicienne à Environnement Canada, instigatrice à la mise au point d'une nouvelle technique d'homogénéisation des températures au Canada et responsable, avec Don Gullett, de l'homogénéisation des données " températures maximales et minimales moyennes mensuelles " à plus de 210 stations de mesure au Canada, couvrant la période 1895 à 1995. Sa confiance, ses judicieux conseils, sa participation active au niveau documentaire, et son intérêt pour ce sujet, ont grandement contribué à l'avancement de ce projet.

Également, je tiens à remercier tout particulièrement Madame Sandra Turner, assistante de recherche de mon directeur, pour m'avoir enseigné mille et une facettes du logiciel excel et pour son aide précieuse en mathématique.

Un grand merci aux trois stagiaires français : Florence Péron, Yannis Cuypers et Thomas Dandres qui m'ont permis de réaliser tous les objectifs que je m'étais fixés dans les délais prévus. Florence a participé activement à la recherche bibliographique, au développement de la méthodologie et au traitement des données. Avec la collaboration et la participation de

Yannis et Thomas, qui sont arrivés à la toute fin, soit au mois de juin 99 et qui ont travaillé à affiner et compléter la correction des multiples calculs, ajustement d'échelles et présentations graphiques, j'ai pu présenter mes résultats finaux de recherche au séminaire de fin d'étude.

J'aimerais dire merci à Patrick Béron, professeur des cours "Méthodologie" et "Élaboration du projet de mémoire" qui, au courant des deux dernières années, a su me faire approfondir la réflexion épistémologique du pourquoi de cette recherche et des intérêts pour la société. Les multiples réunions par petit groupes et les présentations orales, m'ont vraiment incité à développer une ouverture d'esprit et à vulgariser l'information scientifique afin de la rendre compréhensible par le plus grand nombre.

Finalement, j'aimerais remercier monsieur Christian Pagé (assistant de recherche de mon directeur en météorologie à l'UQAM), monsieur Robert Tardif (assistant de recherche de mon directeur en météorologie à l'UQAM) et monsieur Georges Huard (technicien en informatique en sciences de la Terre et de l'Atmosphère à l'UQAM), qui ont tous participé directement ou indirectement à résoudre plusieurs questions d'ordre théoriques ou techniques. Je remercie aussi Alain Bourque, météorologiste à Environnement Canada, pour les multiples informations qu'il m'a fournies tout au long de ma maîtrise avec rapidité, témoignant de son intérêt envers ce sujet.

RÉSUMÉ

Une croyance véhiculée par bon nombre de scientifiques et fortement médiatisée, veut que le réchauffement planétaire provoque une augmentation de la variabilité du climat et des extrêmes climatiques. Cela constitue présentement l'une des préoccupations mondiales majeures du fait des répercussions sur le bien-être des populations, l'environnement, et l'économie. L'objectif principal de cette recherche consiste à élucider en partie cette question pour la province de Québec, à l'aide de la température, le paramètre prépondérant du climat (Env. Can, 1992). Il s'agit donc de vérifier si le réchauffement qu'a connu le Québec au courant du XX^e siècle, a engendré une plus grande variabilité inter annuelle et à chacune des saisons, et inter mensuelle des températures. Au Québec, les relevés de la température maximale et minimale moyenne mensuelle, couvrant la période 1895 à 1995, ont récemment été homogénéisés à plus de vingt deux stations météorologiques réparties du nord au sud de la province. Trois hypothèses sous-tendent l'objectif principal : 1-Le climat actuel est plus variable qu'au début du siècle, lorsque que le climat était plus froid; 2- Il existe une corrélation positive entre la température et la variabilité (puisque nous pensons qu'une hausse de la température va s'accompagner d'une hausse de la variabilité); 3- La période comprise entre 1940 et 1970 a été la moins variable du siècle. Cette dernière hypothèse a été formulée par des chercheurs d'Environnement Canada, et reprise ici afin d'être validée pour le Québec.

Au niveau méthodologique, nous avons d'abord divisé le Québec en quatre zones géographiques. L'échelle temporelle de 30 ans a été retenue pour refléter les tendances au réchauffement et au refroidissement (moyenne mobile), et les tendances à l'augmentation et à la diminution de la variabilité (écart-type mobile) au courant des trois périodes à l'étude : 1895 à 1940, 1941 à 1970, et 1971 à 1995.

Contre toutes attentes, le réchauffement a engendré une baisse de la variabilité inter annuelle et inter mensuelle jusque vers 1970. Après cette date, la légère hausse des températures s'est traduite par une augmentation de la variabilité, presque équivalente à celle du début du siècle, alors que les températures étaient plus froides. L'objectif principal est donc véridique depuis 1970, mais la première hypothèse est rejetée. Les températures moyennes annuelles provinciales étaient plus variables au début du siècle qu'au courant de la dernière période. Également, les corrélations inverses des courbes de la moyenne mobile et de l'écart-type inter annuel et inter mensuel au niveau provincial et zonal, nous obligent à rejeter la deuxième hypothèse. La saison estivale dans le Sud du Québec montre une corrélation positive plus forte (0,65) qu'aux autres saisons, avec un niveau de signification de 99,5%. Pour sa part, la troisième hypothèse est celle qui laisse le moins d'ambiguïté. La période comprise entre 1940 et 1970 a été la moins variable du siècle à l'échelle provinciale et zonale, autant au niveau inter annuel, qu'inter mensuel.

De tels résultats laissent supposer qu'un réchauffement substantiel peut provoquer une élévation de la variabilité au courant des mois les plus chauds, soit à l'été et à l'automne, qui se fera davantage sentir dans le Sud du Québec, là où la température est la plus élevée et où se concentre plus de 80% de la population. Inversement, si la tendance se poursuit, les

régions de basses températures telles que le Nord et le Centre de la province, connaîtront une baisse importante de la variabilité hivernale et printannière. Étant donné l'importance de ce sujet au niveau sociétal pour les générations présentes et futures et devant l'incertitude face au climat, il faut entamer dès maintenant un suivi rigoureux des fluctuations de la température afin de se préparer humainement, environnementalement, et économiquement, à faire face à des changements.

INTRODUCTION

Les changements de la température s'étendent sur différentes échelles de temps. Entre les fluctuations à court terme durables de quelques années et les variations s'étendant au-delà de plusieurs centaines, milliers, et millions d'années, des changements profonds peuvent marquer le cours des choses. Un des événements le plus marquant de l'histoire humaine connue, a été celui des Vikings, alors qu'ils vivaient au Groenland, entre le début du X^e et le milieu du XV^e siècle. Pendant une période d'environ 150 ans après le début du XIV^e siècle, une diminution de la température moyenne terrestre d'environ 0,8 °C a provoqué un petit âge glaciaire entraînant la mort de la colonie (De Vernal, 1997; Le Roy Ladurie, 1967; Grove, 1988). Tout au long de l'histoire, les changements mineurs de la température terrestre se sont révélés être des facteurs de la plus grande importance, qui ont contribué à la grandeur ou au déclin des civilisations. Cet exemple illustre bien les conséquences d'un changement naturel soudain de la température sur la vie humaine, qui pourrait tout aussi bien nous arriver à nous aujourd'hui.

Désormais on ne craint plus uniquement les variations naturelles de la température, mais aussi celles induites par l'humain. Au sujet des changements climatiques, deux écoles de pensées s'opposent (Gangloff, 1996; Lucotte, 1998; Lamothe, 2000; Blanchet, 2000; Bourque, 2000; Brien, 2000). Celle des paléoclimatologues, et celle des météorologues. Les paléoclimatologues estiment le réchauffement actuel comme faisant partie d'un optimum avant le retour vers un âge glaciaire prévu pour bientôt tel que prédit au début des années soixante-dix, alors que les météorologues sonnent l'alarme vers un réchauffement indéfini (Canada, 1990, 1992, 1995, 1997, 1998). La pollution humaine ne parvient peut être pas encore à contrecarrer les paramètres astronomiques responsables des grandes fluctuations, et du même coup, les paléoclimatologues n'ont jamais eu par le passé, à prendre en considération le facteur humain comme élément perturbateur du climat. Nous savons que les températures se sont accrues d'environ 0,6°C dans le monde depuis 100 ans, et d'environ 1°C au Canada (Vincent et Gullett, 1999). Ce réchauffement mondial a été le plus rapide des 15 000 dernières années, et les températures des années 90 suivent une pente ascendante encore plus marquée (Mackenzie et Mackenzie, 1995).

Depuis les années 80, le poids du discours alarmiste de certains météorologues liant un accroissement de la variabilité du climat et des catastrophes naturelles au réchauffement climatique, ont fait naître la peur, l'incertitude et le sentiment d'impuissance dans l'esprit de bien des gens. Les derniers événements survenus au Saguenay en 1996, et la crise du verglas de 1998, ont totalisé des coûts faramineux respectifs de l'ordre de 165 millions et de plus de 1,4 milliard de dollars (Bureau d'assurance du Canada), contribuant à renchérir cette pensée. Étant donné l'inquiétude face à une hausse de la variabilité du climat associée au réchauffement naturel et anthropique actuel, notre objectif est de déterminer si le réchauffement qu'a connu le Québec au courant du XX^e siècle, a engendré une augmentation de la variabilité inter annuelle et inter mensuelle de la température, cette dernière constituant le paramètre prépondérant du climat (Canada, 1992). Pour ce faire, nous avons travaillé avec les températures moyennes mensuelles homogénéisées, enregistrées entre 1895 et 1995, à travers 22 stations météorologiques au Québec (Vincent et Gullett, 1999). Nous avons vérifié les trois hypothèses suivantes : 1-Le climat actuel est plus variable qu'au début du siècle, lorsque le climat était plus froid; 2-Il existe une corrélation positive entre la température et la variabilité (puisque nous pensons qu'une hausse de la température va s'accompagner d'une hausse de la variabilité); 3- La période comprise entre 1940 et 1970 a été la moins variable du siècle.

La difficulté de reconstituer des séries ininterrompues et la non-homogénéisation des données au début des années 80 avait contribué à restreindre les deux seules recherches effectuées par Marchand (1984) et Lemoine (1981) sur la variabilité du climat québécois, aux villes de Montréal et Québec. Aujourd'hui, la situation est toute autre. Le nombre important de stations dont les données ont été homogénéisées afin d'obtenir une lecture continue du climat à travers l'histoire, la distribution spatiale à travers tout le territoire québécois, et la performance des logiciels actuels, nous permettent d'aller bien au-delà de ce qui a déjà été fait. De plus, en ajoutant les 20 dernières années à notre étude nous verrons d'autres tendances se dessiner.

Ce mémoire comprend cinq chapitres. La variabilité des températures a été introduite au premier chapitre à travers les définitions et explications de concepts clés, et en faisant le

survol d'études réalisées en ce domaine à l'échelle mondiale. Le second chapitre met en évidence la primauté pour les québécois, de rendre compte de l'instabilité du climat au Québec, et de l'inquiétude face aux tendances futures de la variabilité des températures liées au réchauffement. L'exemple des conséquences sociales, environnementales et économiques vécues dans diverses régions du monde et transposable au Québec, et de scénarios futuristes, sont décrits dans le but d'aider à l'établissement de plans de gestion environnementale adéquats. Le chapitre trois résume les moyens et les techniques employées au Québec et partout dans le monde, depuis cent ans et plus, pour maintenir un suivi de l'évolution de la température. Les techniques d'analyses des données de la température moyenne mensuelle sont présentées au chapitre quatre, et les résultats au chapitre cinq.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS

1.1 Terminologies

" Qu'est-ce que la variabilité? "; " Quels sont les paramètres utilisés pour caractériser le climat d'une région? "; " Qu'est-ce que la variabilité du climat? "; " Qu'est-ce que la variabilité des températures? "; Ces questions nous ont été posées fréquemment au courant des deux dernières années, que ce soit lors de séminaires en sciences de l'environnement ou lors de conversations sur le sujet. Les termes "variabilité", "climat" et "température" représentent les trois concepts fondamentaux de cette recherche dont toute personne s'intéressant au sujet doit en saisir le sens avant de poursuivre la lecture. Il importe donc d'en donner ici les définitions.

1.1.1 La variabilité

D'abord, le concept VARIABILITÉ vient du mot latin VARIA qui signifie choses diverses (Petit Larousse illustré, 1974 p. 1063). Également, Le Petit Larousse illustré 1999 définit la variabilité comme suit : " *Caractère de ce qui est variable, de ce qui est susceptible de se modifier dans le temps ou dans l'espace* ", et cite l'exemple de la " Variabilité climatique ".

Le Petit Robert 1 (1997) définit ce qui est variable de la façon suivante : " *adj et n.. (fin XII^e; lat. variabilis), 1. Qui est susceptible de se modifier, de changer souvent au cours d'une durée. V. Changeant, incertain, instable. Temps variable (Météor)* "; alors que Le Petit Larousse donne également une définition mathématique, indispensable dans ce cas-ci puisqu'il s'agit d'une étude statistique: " *1. MATH. Élément qui peut prendre des valeurs différentes à l'intérieur d'un ensemble, d'un système, d'une relation* ".

Maints phénomènes observés dans l'environnement naturel (tels les inondations, les sécheresses, les feux de forêts, etc.) se répètent d'eux-mêmes à des intervalles de temps irréguliers et à des intensités variées. Par exemple, un phénomène peut se produire à un intervalle moyen de 7 ans, incluant quatre épisodes de 8 ans, 4 ans, 6 ans et 10 ans, et où chacune d'elle sévira de façon plus ou moins importante. Il n'y a donc pas que la variation de

l'événement dans le temps dont il faut tenir compte, mais également de l'amplitude des variations des événements (Hidore, 1996).

1.1.2 Le climat

Le Petit Larousse illustré version 1999 définit le climat comme étant un " *Ensemble de phénomènes météorologiques (température, humidité, ensoleillement, pression, vent, précipitations) qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un lieu donné.* "

Certains météorologues précisent l'importance de faire la distinction entre le temps et le climat. Le temps étant la condition de l'atmosphère à n'importe quel point dans le temps et l'espace, ce qui signifie que non seulement le temps change à n'importe quel endroit à travers le temps, mais différentes places expérimentent différents temps. Par exemple, la neige fait partie du temps de certains endroits et non de d'autres. Le climat quant à lui, constitue le régime du temps moyen à certains endroits pour une période donnée. Cela inclut les phénomènes de temps les plus fréquents aussi bien que les moins fréquents. Pendant que le temps change rapidement dans le temps, le climat reste plus stable et les changements surviennent sur de plus longues périodes, telles des dizaines et des centaines d'années. La question posée consiste alors à savoir si ce ne serait pas plutôt le temps qu'il fait qui est actuellement influencé par la pollution humaine plutôt que le climat (Hidore, 1996).

1.1.3 La température

Le Petit Larousse illustré (1999) définit aussi la température par l' " *Ensemble des conditions atmosphériques traduites subjectivement en sensations relatives de chaud et de froid, et dont l'appréciation exacte est fournie par l'observation du thermomètre.* "

La température qui dépend de l'intensité de l'énergie solaire, représente à elle seule, le paramètre prépondérant des climats de la terre (Canada, 1990). Elle détermine le taux d'évaporation et de précipitation et donc, les zones de hautes et de basses pressions, la densité de l'air, et la direction et la vitesse du vent. Également, si d'importants plans d'eau se situent à proximité d'une région, la température permettra d'avoir une bonne approximation du cycle hydrologique de celle-ci. Ainsi, de grandes étendues d'eau et des températures élevées auront tendance à générer des pluies abondantes, alors qu'en l'absence d'eau, une même température

causera des sécheresses. La température, par l'intermédiaire de la présence ou de l'absence d'eau, aura donc une influence sur la répartition géographique des espèces végétales et animales. Dépendamment de la nature du sol, la température définira en quelle quantité et sous quelle forme l'eau sera acheminée aux plantes, et à son tour, la forêt permettra le maintien de l'équilibre éco-climatique du milieu (Canada, 1990).

1.1.4 La variabilité du climat

Les études géologiques, biologiques et historiques réalisées sur les variations du climat de la Terre montrent tous que notre atmosphère n'est jamais restée la même pendant très longtemps. Le temps oscille de manière irrégulière entre des années chaudes et froides, et entre des périodes sèches et humides. Les années chaudes et froides se rassemblent souvent, telles que les années sèches et humides, et cela n'est pas dû aux effets aléatoires. Ce qui est aléatoire, c'est l'interaction entre les diverses composantes atmosphériques. Les courbes d'oscillations empruntées par chaque paramètre ne dépassent jamais cependant une certaine amplitude limite. Plusieurs courtes oscillations varient de 1 à 10 ans, tandis que d'autres oscillations intermédiaires varient entre 10 et 100 ans et ne sont pas mesurées directement. Les grandes oscillations quant à elles surviennent à des intervalles de plus de 1000 ans (Hidore, 1996).

Environnement Canada donne la définition suivante de la variabilité du climat : « La variabilité du climat est un phénomène naturel suscité par les différences thermiques des masses d'air, les changements dans la distribution des courants océaniques et de la température à la surface de l'eau, des éruptions volcaniques, des fluctuations de l'énergie émise par le soleil et de paramètres orbitaux telles que l'inclinaison de l'axe de la terre par rapport au soleil, de la trajectoire elliptique de la terre autour du soleil, et d'autres facteurs du système climatique qui ne sont pas encore bien connus. » (Canada, 1997, p.2)

1.1.5 La variabilité des températures

Les températures ont considérablement varié au courant des 4,6 milliards d'années de l'existence de la Terre, passant de périodes glaciaires à des périodes interglaciaires (de réchauffement importants). Il suffit d'abaisser la température moyenne globale de seulement

4 °C pour passer d'une période interglaciaire telle qu'actuellement, à une période glaciaire (Canada, 1997). En remontant à des époques plus lointaines, le chaotisme de la courbe des températures devient flagrante, oscillant toujours de manière quasi-imprévisible à l'intérieur d'un intervalle, qui lui est cependant bien défini. Par exemple, la température maximale moyenne n'a jamais été en dessous de +10° C, ni au-dessus de +16°C. À l'intérieur de + 10 ° C et de +16 ° C, la courbe peut prendre une infinité de formes différentes non superposables, rendant les prévisions à long terme difficiles (Mackenzie et Mackenzie, 1995). Malgré tout, les paléoclimatologues ont découvert de fortes corrélations entre les grandes oscillations de la température à la surface de la Terre et les paramètres astronomiques, tels que les cycles de Mc Crae et de Milankovitch, ou avec les cycles de 11 ans des taches solaires. De Vernal (1997) du département des sciences de la Terre et de l'Atmosphère à l'UQAM, évoque que l'alternance de périodes glaciaires et interglaciaires " ... ne sont pas arbitraires, ni chaotiques. On les associe aux variations quasi cyclique des paramètres orbitaux de la terre, soit l'excentricité, l'inclinaison de l'axe de la terre et la précession des équinoxes, qui déterminent l'insolation à la surface de la planète " (cycles de Milankovitch) et aux nuages de poussières interstellaires, qui rendent compte de turbulences climatiques " (cycles de Mc Crae). D'autres corrélations, intrinsèques à la Terre elle-même, ont été trouvées entre les concentrations de dioxyde de carbone et de méthane, deux gaz à effet de serre important, et les variations de la température à des époques antérieures. La circulation thermohaline des océans constitue un indicateur de variabilité de la température important, puisqu'il permet le transport des flux de chaleur vers les hautes latitudes. La multiplicité des découvertes récentes laisse entrevoir que malgré les interactions cahotiques des paramètres influençant le climat, il existe tout de même une certaine cyclicité dans les tendances générales empruntées par la courbe des températures et de ses amplitudes, qui elles, peuvent être prévisibles (Hidore, 1996).

Dans le cadre de cette étude statistique, nous avons établi notre propre définition de la variabilité des températures qui se traduit comme suit : *La variabilité des températures se reflète par les oscillations de la température au-dessus et en-dessous de la moyenne calculée sur une période donnée.* Une méthode couramment employée pour mesurer la variabilité consiste à utiliser l'écart-type ou la variance, qui permettent justement de mettre au carré les écarts de la température à la moyenne, et facilite ainsi, la visualisation des amplitudes.

La crainte d'une augmentation de la variabilité des températures face au réchauffement, s'explique par les phénomènes physiques suivant : à méso-échelle, des températures élevées provoqueront davantage d'évaporation, de vapeur d'eau dans l'atmosphère, et de chaleur latente qui constitue une source d'énergie pour le développement d'orages. Les tempêtes associées aux zones de basses pressions pourront accentuer les extrêmes de la température entre la région chaude de la basse pression et l'air plus froid environnant. Les océans qui requièrent beaucoup plus de temps avant d'augmenter leur température à la surface, déploieront une plus grande énergie à l'intérieur des tempêtes, ce qui aura pour effet de rehausser l'amplitude des températures. La variabilité saisonnière sera elle aussi plus marquée. L'augmentation de l'alternance de neige, pluie, et peut-être même de verglas, pourra être plus fréquent d'un jour à l'autre en hiver. La hausse de la température contribuera à accroître la fréquence et l'intensité des tempêtes à l'échelle synoptique au printemps, et à l'échelle locale en été. Les périodes de sécheresses et de chaleurs accablantes estivales se poursuivront probablement plus tard à l'automne. (Communications personnelles : Blanchet, 2000; Bourque, 2000, et Brien, 2000)

1.2 État des connaissances

1.2.1 Le climat au Québec

Le Québec est la plus vaste des dix provinces canadiennes et possède également la plus grande superficie en eau douce. Sa superficie englobe trois fois la France (Québec, 1995). Le climat évolue, du sud au nord, de modéré à polaire. Le nord du Québec est influencé par les masses d'air arctique, le centre par les vents dominants d'ouest, et le sud, par les masses d'airs chauds et humides en provenance du golfe du Mexique, par les vents d'ouest, et par l'océan Atlantique (Canada, 1990). À l'exception des régions de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent, où se fait sentir l'influence des masses d'eau, l'ensemble du Québec présente un climat continental. On retrouve onze types de climats dans autant de régions climatologiques (Québec, 1995). Les climats secs se retrouvent uniquement au nord du 57 ° parallèle. La masse d'air Arctique froid et sec est responsable des vagues de froid intense survenant au courant des mois de décembre et de janvier. Cependant, on attribue les tempêtes hivernales de forte intensité et les épisodes de temps violent estival dans le sud du Québec aux masses d'air chauds et humides en provenance du Golfe du Mexique. Juillet est le mois le plus chaud,

tandis que janvier est généralement le plus froid. En raison de l'effet modérateur des masses d'eau du Golfe du Saint-Laurent et de l'Atlantique, on observe un décalage saisonnier d'environ un mois aux Îles-de-la-Madeleine. Ainsi, février représente le mois le plus froid comme partout ailleurs, et août le mois le plus chaud contrairement au reste du Québec où il s'agit du mois de juillet (*voir* App. B., p. 78) (Québec, 1995).

Les eaux de surface, la configuration du terrain et la nature de la couverture végétale ont une grande influence sur la situation météorologique. Ce sont les rapports complexes existant entre ces divers facteurs qui déterminent le caractère et la diversité du climat à un endroit donné (Canada, 1990, p. 87).

" La Côte-Nord du golfe du Saint-Laurent possède un climat plus maritime avec des hivers humides propices aux tempêtes et aux précipitations de neige, et des étés frais et des brouillards fréquents. Du point de vue climatique, le sud du Québec est typiquement canadien : hiver rigoureux aux paysages recouverts de neige; été chaud avec des périodes occasionnelles de temps très chaud et humide. À l'intérieur de la vallée du Saint-Laurent se heurtent l'air froid et sec du nord et l'air chaud et humide du sud. Plusieurs composantes telles que la latitude, la topographie, la proximité relative de vastes étendues d'eau, la circulation atmosphérique et l'altitude moyenne des Basses-Terres du Saint-Laurent qui avoisine les 40 m au-dessus du niveau moyen de la mer, influencent le climat du Québec" (Canada, 1990).

1.2.2 L'humain et le climat

1.2.2.1 L'augmentation de la population mondiale et de la pollution

Autour des années 1650, la population mondiale était d'environ 500 millions. Ce n'est qu'en 1830 qu'elle atteint le premier milliard d'habitants. Aujourd'hui le nombre d'habitants dépasse les six milliards. Il a fallu environ 4 millions d'années à l'espèce humaine pour atteindre le premier milliard d'individus sur terre, et en l'espace d'à peine 170 ans, la population mondiale passe de un milliard à six milliards. Cette croissance exponentielle de la population et des besoins en ressources a pu se réaliser grâce à la révolution industrielle qui a débuté entre 1783 et 1812 en ce que nous appelons aujourd'hui la Grande-Bretagne. La

révolution industrielle a résulté en une combinaison de facteurs, élevant de façon significative l'espérance de vie et le taux de croissance de la population, ce qui représente aujourd'hui à la fois une menace à l'échelle mondiale (agrandissement du trou d'ozone, réchauffement climatique, etc.) et régionale (épuisement des ressources : eau, forêt, sols, poissons, etc.) (Hidore, 1996).

Aujourd'hui, les changements de la température affectent des dizaines de millions de gens, si ce n'est l'humanité. Durant la première partie de l'histoire humaine, les mutations ont permis aux espèces d'exercer un contrôle sur leur habitat. Dans la dernière partie de l'histoire humaine, la technologie a permis plus qu'une adaptation physique avec les instruments utilisés pour modifier notre environnement. L'étude des origines de certaines inventions de base dans l'histoire met en évidence le fait qu'il s'agit d'un processus continu, dynamique et souvent imprévisible. La technologie a permis, grâce à l'irrigation massive, de transformer des parties désertiques du monde en terres agricoles riches. La croissance rapide et la résistance de variétés de grains ont permis d'étendre l'agriculture à des limites plus au Nord qu'aux décennies précédentes. La technologie a créé des environnements artificiels qui nous permettent de voyager dans l'espace entre la Terre et la Lune, sous la surface de l'océan et en Arctique et en Antarctique sans changer la physiologie humaine. Les humains travaillent à refaçonner la surface de la Terre, à changer le cours des rivières, et à altérer les habitats fauniques et floristiques. La supposition est que nous pouvons toujours avoir le dessus sur la nature. Le taux auquel nous avons altéré l'environnement est parallèle à la croissance des populations humaines. Nous pouvons créer plus de transformations à plus d'endroits qu'auparavant et les impacts de ces changements deviennent plus grands chaque jour.

Les activités humaines induisent aujourd'hui plus de six gigatonnes de gaz à effet de serre dans l'atmosphère chaque année, dont quatre sont attribuables aux industries et aux automobiles, et deux à la déforestation (Prichonnet, 1998). Par exemple, si seulement les 14 millions de voitures au Canada consommaient un litre d'essence de moins au 100 km, les émissions annuelles de dioxyde de carbone diminueraient d'environ 3,3 millions de tonnes, ce qui équivaldrait à fermer deux centrales thermiques de 450 Mw. Les concentrations de dioxyde de carbone sont actuellement de 30% supérieures aux valeurs les plus élevées

atteintes au cours des 160 000 dernières années. Les gaz à effet de serre à l'état naturel ne représentent que 1% de l'ensemble des gaz constituant l'atmosphère, cela signifie que leur concentration relative peut facilement changer.

1.2.2.2 Le réchauffement de la température à l'échelle globale

La température moyenne à l'échelle globale a augmenté entre 0,4 et 0,8 °C depuis la fin du 19^e siècle. Cette hausse est survenue en deux périodes, soit de 1910 à 1945, et de 1976 à 1998, et a été plus rapide au cours de cette dernière période dans les latitudes nord (Karl et al., 2000). Le réchauffement des années 1910-1945 a été concentré surtout dans l'Atlantique Nord et les régions avoisinantes. En contraste, la période 1946-1975 représente une période froide dans l'Hémisphère Nord. Depuis 1976, il y a un retour de la chaleur au-dessus des continents des moyennes et des hautes latitudes, qui est encore plus prononcé durant l'hiver et le printemps, avec quelques années froides dans le nord-ouest de l'Atlantique et dans le centre du Pacifique nord. Plusieurs études (Wang et Wang, 1996; Terence et Compo, 1998; Terence et Webster, 1998; Allan et al., 2000) ont montré qu'El Niño est survenu à une fréquence moyenne de 3-4 ans au cours du dernier 40-50 ans, alors qu'elle était de 3,4 à 7 ans auparavant. Le réchauffement global depuis 1970 a été influencé par une élévation de la phase positive ouest des oscillations dans l'Atlantique nord et de l'Arctique, et possiblement, de la phase chaude de l'oscillation inter-décennale du Pacifique. Les fluctuations multi-décennales de la température de la mer à la surface dans l'Atlantique Nord ont subi une augmentation depuis le milieu des années 80, et depuis cinq ans, cette élévation est parallèle à la hausse des températures à la surface du continent européen, ce qui démontre l'interdépendance des échanges entre l'océan et l'atmosphère. Les dernières analyses des températures maximales et minimales moyennes journalières, montrent une réduction des températures diurnes et une augmentation des températures minimales nocturnes équivalente au double des températures maximales (Easterling et al., 1997). Les séries temporelles des températures maximales et minimales moyennes mensuelles de plus de 1200 stations climatiques américaines entre 1950-1996 analysées par Gallo et al. (1999) et divisées en trois groupes, stations urbaines, suburbaines et rurales, ne montrent pas de différences significatives entre ces trois catégories.

1.2.3 La variabilité des températures dans le monde et au Québec

Les chercheurs tels que Michaels et al. (1998) s'étant penchés sur l'analyse de la variabilité des températures à la surface de la Terre en utilisant la technique de recouvrement par quadrats, 5° de latitude par 5° de longitude, se sont vus restreints à établir des conclusions surtout au niveau de l'Hémisphère Nord, étant donné le nombre insuffisant de stations couvrant l'Hémisphère Sud. De façon générale, les résultats indiquent qu'au fur et à mesure que la température a augmenté au courant du XX^e siècle, la variabilité inter annuelle et inter mensuelle a diminué (Michaels, 1997; Wallace, Zhang et Bajuk, 1996). Un réchauffement global plus prononcé a été décelé durant les saisons froides (hiver et printemps) au-dessus des hautes latitudes depuis 1970 et les données constituant la saison froide montrent une plus grande variabilité d'un mois à l'autre, tandis que la saison chaude se caractérise par une variabilité inter annuelle plus élevée (Wallace, Zhang et Bajuk, 1996).

Marchand (1984) et Lemoine (1981) ont travaillé sur la tendance du climat québécois entre 1798 et 1975. L'objectif principal de leurs recherches consistait à rétablir et analyser les courbes des températures, des précipitations et de la pression atmosphérique des séries instrumentales pour les villes de Montréal et Québec, en référence avec la plus ancienne station du Canada, c'est-à-dire Toronto (1840). Ces reconstitutions devaient servir à trouver les tendances annuelles et saisonnières entre la température moyenne annuelle et certains paramètres du climat, tels que le nombre de jours de gel, le nombre de jours de pluies, etc., et tenter de découvrir les causes des variations climatiques en association au phénomène cyclique de 11 ans des taches solaires. Lemoine (1981) avait découvert que la température refroidit de 1798 à 1884, se réchauffe de 1884 à 1952, et refroidit à nouveau jusqu'en 1975, mais surtout l'hiver. Il semble que le cycle de 11 ans des taches solaires coïncide aux fluctuations enregistrées dans les courbes d'oscillations des trois paramètres étudiés et qu'il en serait la cause.

CHAPITRE II

L'IMPORTANCE D'ÉTUDIER LA VARIABILITÉ DES TEMPÉRATURES AU QUÉBEC

2.1 Aspects sociaux

2.1.1 Le petit âge glaciaire

Les études paléoclimatiques effectuées dans les archives révèlent que la température moyenne de la Terre a varié de façon brutale et sur de grandes amplitudes à plusieurs reprises au cours de l'histoire humaine. Onze mille à dix mille ans avant l'actuel (Dryas récent), une baisse de la température d'environ 10 °C au Groenland et de 8 °C en Europe de l'ouest a provoqué la descente latitudinale du front polaire de plus de 2 000 km dans l'Atlantique du nord-est (De Vernal, 1997). Plus tard, il y a 5 000 ans, un optimum climatique s'est caractérisé par des températures estivales chaudes équivalentes à 3 ou 4 °C au-dessus de ce que nous connaissons aujourd'hui dans les hautes latitudes, et de 1 à 2 °C dans les moyennes latitudes (Canada, 1992). Aucun indice rapportant les conséquences de ces variations de la température sur la vie humaine n'a été trouvé ou transcrit jusqu'à présent sur ces deux périodes. Il faudra attendre le X^e siècle pour que des premiers écrits soient relatés concernant les effets de la température sur les populations.

Le dernier petit âge glaciaire a occasionné la mort des Vikings vers le milieu du XV^e siècle, alors qu'ils vivaient au Groenland. Pendant plusieurs années, les conditions climatiques en Europe étaient bonnes. Les moissons pauvres et les famines étaient peu fréquentes. Les glaces dispersées plus au Nord n'obstruaient pas la navigation, ce qui rendait les communications entre la Scandinavie, l'Islande et le Groenland encore plus faciles qu'aujourd'hui puisque la température moyenne de la Terre était d'environ 0,4°C supérieure à celle d'aujourd'hui. Les terres étaient cultivées en Islande et au Groenland. Les pêcheries au Nord étaient florissantes et en Europe centrale, la vigne était produite 500 km au nord de la limite actuelle. Après l'année 1200, les choses ont commencé à se gâter. En l'espace d'environ 50 ans, la température moyenne de la terre a chuté d'environ 0,8 °C, entraînant la formation de glaces de mer et de tempêtes. Le dernier reportage d'un voyage à l'île du vin a été fait en 1347. La vie au Groenland commençait à être de plus en plus difficile. Les

groenlandais étaient coupés de l'Islande et allaient éventuellement disparaître de l'histoire vers 1450. La présence d'un pergélisol rendait les cultures impraticables et la glace de mer limitait la remontée des poissons à des régions plus au sud. Le froid, le manque de communication avec l'Islande, de ressources et de nourritures, ont provoqués la mort de la colonie. Entre le XVII^e et le XVIII^e siècle, l'avancée des glaciers et la forte houle étaient à leur maximum et continuaient de détruire les fermes et d'endommager les villages en montagnes en Europe et en Islande (Le Roy Ladurie, 1967; Grove, 1988).

Ce fait vécu, et d'autres plus anciens non encore répertoriés, montrent la vulnérabilité des populations aux variations de la température occasionnées par un réchauffement ou un refroidissement, et l'importance de se prémunir efficacement pour faire face à d'éventuels changements soudains de la température. Ces événements dramatiques vécus à proximité du territoire québécois, nous portent à réfléchir sur l'éventualité que cela puisse se reproduire chez nous et affecter cette fois-ci, un plus grand nombre de personnes. Même si la tendance actuelle et les prévisions futures nous porte à envisager des années à venir plus chaudes, et qu'aucun scénario vers un refroidissement n'a encore été envisagé, il ne faut pas perdre de vue que les conséquences des refroidissements soudains dans le passé resteront plus dramatiques que celles prédites en vue d'un réchauffement.

2.1.2 Effets anticipés d'un réchauffement plus prononcé et d'un accroissement de la variabilité sur la santé humaine

Une augmentation de la fréquence et de la gravité des vagues de chaleur peut se traduire par un accroissement des maladies et des décès, surtout chez les jeunes enfants, les personnes âgées, les gens fragiles et les malades chroniques, et en particulier dans les grandes agglomérations du sud-est de l'Ontario et du sud du Québec. Les travaux actuels au Québec effectués par Environnement Canada (1997) précisent les liens de cause à effet entre le climat anticipé au milieu du prochain siècle et l'apparition de problèmes de santé, notamment entre des conditions de chaleur particulière et la mortalité dans des villes comme Toronto, Montréal et Ottawa. Le taux de mortalité par chaleur excessive (29°C et 33°C) pour une population acclimatée serait de quatre fois supérieure au taux actuel. De plus, les températures plus élevées renforceront la production de divers polluants secondaires, comme l'ozone et les matières particulaires. Par ailleurs, une augmentation de la fréquence et de

l'intensité des tempêtes et d'autres phénomènes extrêmes comme les tornades, la grêle, les vents forts et les pluies abondantes pourra accroître le nombre de décès, de blessures, de maladies infectieuses et de troubles liés au stress. Certaines maladies des régions tropicales (comme la malaria et le fièvre jaune) pourraient s'étendre vers le nord jusqu'au Canada, ce qui solliciterait encore plus les soins de santé (Environnement Canada, 1997). De plus,

"Les règlements sanitaires indiquent que les températures qui conviennent le mieux dans nos climats à un individu assis, sans activité physique notable sont en hiver de 20 à 21°C, et en été de 21 à 22°C. Une température plus élevée est nécessaire en été, car à température superficielle de la peau égale, la température ambiante doit être supérieure pour que le corps élimine la même quantité de chaleur. La température optimale d'un individu sans vêtement est de 28°C" (Recknagel Sprenger, 1980, p.40). Ces limites pourraient venir compromettre le bien-être des individus physiquement et mentalement si la température et les extrêmes augmentent au Québec. La coopération entre la médecine et la météorologie devrait offrir la promesse d'un progrès plus sûr. Cette coopération est indispensable, car si un pays comporte une grande proportion d'individus en mauvaise santé, les efforts déployés pour élever son niveau de vie sont compromis.

2.2 Aspects économiques

Au Québec, l'économie et la vie en général sont grandement influencées par la variabilité des températures : le tourisme, les loisirs, l'énergie, le transport, la foresterie, l'agriculture, les pêches, etc.. La température a une incidence sur le prix de la nourriture, le coût du chauffage et de la climatisation de nos maisons, le type de vacances et de loisirs qui nous sont offerts, l'utilisation des services de santé, la manière dont nous gagnons notre vie, et bien d'autres choses.

Sur une courte échelle de temps, la température conditionne le meilleur moment des diverses activités de l'agriculture, la dispersion de la pollution atmosphérique, l'exploitation la plus économique d'un barrage, la demande d'électricité, de gaz, et de charbon pour le chauffage domestique. Aussi, une mauvaise nourriture, des vêtements insuffisants ou des maisons mal conçues sont des facteurs qui contribuent à la détérioration de la santé. Lorsque le travail

s'effectue en plein air, la variabilité des températures affecte le plus directement l'industrie. Toutefois, même les industries où le travail est effectué à l'intérieur ont également besoin de connaître le temps qu'il fera et d'avoir une meilleure connaissance des tendances de la variabilité des températures pour les conditions de travail. Le choix de l'emplacement, l'établissement de plans, le conditionnement de l'air, le chauffage et l'éclairage, sont autant de problèmes auxquels doivent faire face les industries dans la planification de leur dépenses (OMM, 1964). La température peut également être un facteur d'extension de la maladie, ce qui engendre des coûts supplémentaires à la société.

Un grand nombre de risques contre lesquels les gens s'assurent eux-mêmes et assurent leurs biens sont liés directement ou indirectement au temps. Les compagnies d'assurance doivent parvenir à fixer leurs primes à des taux qui ne soient pas exagérés (ce qui découragerait les assurés), mais qui soient cependant assez élevés pour permettre un bénéfice raisonnable. L'assurance maritime et l'assurance des récoltes en constituent deux exemples évidents (Smith et Kohler, 1964).

Au Québec, encore aujourd'hui, les cultures céréalières et maraichères sont étudiées comme indicateurs de variabilité climatique à cause de leur sensibilité face aux fluctuations de la température et des précipitations. Trois séries de sondages effectuées à différentes régions du sud de la province du Québec par plusieurs professeurs du département de géographie de l'Université de Montréal (Bryant et al., 1997), ont permis d'avoir la perception des agriculteurs concernant l'avenir de l'agriculture face aux changements climatiques anticipés dans le futur. À l'Île d'Orléans, les agriculteurs ont tous constaté que les hivers des dix dernières années avaient été moins sévères, qu'il y avait eu un manque d'eau et des sécheresses pendant certaines saisons, et des écarts de température plus importants. Leurs craintes face au réchauffement futur se situent surtout au niveau de l'aggravation de ces phénomènes qui les inciterait à adopter davantage des techniques d'irrigation et de contrôle des eaux de surface.

Selon Singh (pour Environnement Canada, 1987), une élévation de la température au Québec occasionnerait de meilleures conditions agricoles pour les régions situées à proximité de

Montréal. D'ailleurs, les sondages réalisés auprès des agriculteurs entourant la région de Montréal et prenant en compte ces considérations, révèlent que les agriculteurs se sentent confiants et prêts technologiquement à faire face aux changements. Les cultivateurs des régions de Lotbinières et du sud-ouest de Montréal craignaient quant à eux, une augmentation de l'intensité des précipitations et de la prolifération des insectes ravageurs (Bryant et al., 1997). Cette étude a permis de mettre en évidence l'importance de la variabilité agro-climatique pour les processus décisionnels des agriculteurs.

2.3 Aspects environnementaux

Les facteurs de l'environnement physique ont été résumés ici en trois catégories jugées parmi les plus importantes : l'eau, la forêt, et les animaux.

Les données de base dans diverses parties du monde : débits mensuels et annuels, débits annuels maximum, et quantité mensuelle de pluie, ont permis de mesurer les caractéristiques débit/écoulement à l'échelle continentale. Les différences intercontinentales annuelles les plus marquées se situent au niveau de la variabilité des précipitations associées à la variabilité des températures. Un modèle unique de réservoir linéaire utilisé en 1987, semble suggérer que la plus grande variabilité de précipitation effective résultant d'une évaporation intense, est une des causes majeures des différences observées dans la variabilité de l'écoulement des eaux (Slivitzky, 1997).

Les précipitations sont à la fois la source de l'approvisionnement en eau douce et la cause des inondations. L'épuisement des réserves d'eau par évaporation et par transpiration est également régi en grande mesure par la variabilité de la température. Le rôle de la variabilité de la température dans l'aménagement des ressources hydrauliques est donc d'une importance extrême. Des prévisions quantitatives concernant les précipitations et la température peuvent être utilisées pour étendre la validité des prévisions hydrauliques. Les rapports entre la température et l'eau constituent un moyen d'appliquer la connaissance météorologique aux problèmes relatifs à l'eau (Slivitzky, 1997).

Une étude (Swetnam et Betancourt, 1998) sur les feux de forêt des 400 dernières années a été menée dans le sud-ouest américain et est transposable pour le Québec, à cause de l'augmentation de tempêtes estivales prévues et des fortes corrélations existant entre les éclairs et les feux de forêt. À travers des cycles annuels et decennals, de l'échelle locale ($<100\text{km}^2$) à régionale ($10\,000\text{--}1000\,000\text{km}^2$), les sources de charbon dans le sol, la physionomie végétale et la diversité des espèces animales et végétales permettent de prédire le déploiement de phénomènes biogéographiques. Les variables climatiques, telles que la radiation, la température, et les précipitations, déterminent le taux de productivité primaire du sol. Les analyses révèlent un climat plus variable et plus complexe qu'auparavant. Durant la période aride avant l'été, les combustibles sont secs, les tempêtes convectives commencent à produire des éclairs causant des feux de forêt, ce qui a pour effet de brûler une partie maximale du territoire. Les fortes corrélations inter annuelles ($r = 0,7$ à $0,9$) durant des décennies spécifiques (circa 1740-1780 et 1830-1860) reflètent des périodes de hautes amplitudes dans les oscillations du sud, entraînant des feux à travers toute la région. La faible corrélation entre les années 1780 et 1830 correspond à une baisse de la fréquence d'oscillations ou de l'amplitude. Bien que l'influence de la variabilité de la température et du climat saisonnier sur les feux de forêt est évidente, les aspects prédictifs de l'association "sécheresse-feux" restent pauvrement compris.

Une tendance majeure de l'évolution des animaux a été le développement progressif de mécanismes homéostatiques complexes. Au fur et à mesure que ces mécanismes ont évolué, il y a eu une augmentation de l'indépendance face aux fluctuations de l'environnement extérieur. Le développement de mécanismes de régulations variés pour contrôler la température du corps est un excellent exemple d'une des principales approches utilisées par les animaux pour échapper à la tyrannie des flux de facteurs environnementaux telle que la température. Toutefois, alors que certains animaux ont aujourd'hui une parfaite habileté de thermorégulation, d'autres n'ont pas de mécanismes de contrôle de la température de leur corps. Entre ces deux extrêmes, l'adaptation de chaque espèce à son environnement extérieur varie de quelques degrés, et sont associés à différentes étapes de développement et aux phénomènes cycliques associés à d'autres stades de développement, tel le rythme diurne. Étant donné que ce sont les températures minimales nocturnes qui ont augmentés à l'échelle

globale, cela a des effets sur le rythme nocturnes de plusieurs espèces animales (Whittow, 1970).

La fonction thermique présente la caractéristique exceptionnelle d'avoir des modalités d'expression très différentes selon les espèces animales; par exemple, la lutte contre la chaleur s'effectue par sudation chez l'Homme, par polypnée thermique chez le chien, par d'autres moyens chez d'autres Mammifères (Houdas et Guieu, 1977).

Les problèmes liés à une augmentation de la variabilité des températures est que certains poïkilothermes (animaux à sang froid) ne supportent que des variations excessivement faibles de leur température. Cette soumission à une température ambiante relativement fixe est un fait très courant chez les poïkilothermes. Cela explique l'adaptation des faunes à des conditions climatiques ou écologiques très précises. Ce même problème existe aussi chez les végétaux. En fait, la distinction capitale entre poïkilothermes et homéothermes réside en ce que les seconds ont, vis-à-vis d'une perturbation thermique, une attitude active, tandis que les premiers assistent passivement à la perturbation et s'y soumettent ou meurent (Houdas et Guieu, 1977).

2.4 Les prévisions futures

En 1987, un premier travail de grande envergure portant sur les impacts bio-physiques et socio-économiques d'un réchauffement au Québec, a été réalisé par Singh et al. (pour Environnement Canada, 1987). En comparant les résultats d'analyses des paramètres "températures" et "précipitations" moyennes mensuelles à la période de référence 1951-1980, selon deux modèles de doublement de CO₂, des conclusions ont été avancées au niveau des secteurs de l'énergie, de l'agriculture et de la foresterie. Dans le secteur énergétique, l'analyse a porté sur trois bassins majeurs du territoire de la Baie James (La Grande, Caniapiscau et Opinaca) et de la demande future en énergie pour les grandes agglomérations telles que Montréal et Québec. Au niveau de la foresterie, les résultats couvrent l'ensemble du territoire, alors que le secteur agricole couvre tout le sud du Québec jusqu'à la Baie James.

De façon générale, l'étude prévoit une demande en eau des bassins hydro-électriques supérieure de 6,7% à 20,2% d'ici l'an 2050, une baisse de la demande de chauffage de -21,8 à

-29.1 % à Montréal et à Québec, mais une hausse importante de la demande d'énergie pour la climatisation. Également, on prévoit des conditions agro-climatiques semblables à celles se trouvant le long de la frontière canadienne au nord-est des États-Unis pour tout le sud du Québec. Une saison de croissance allant de 22 jours à 72 jours, un fort potentiel agricole pour des régions telles que l'Abitibi et le Lac St-Jean, mais une dépendance à l'irrigation sont à envisager. De la même façon, la croissance des arbres serait favorisée. L'élévation de la température engendrerait un déplacement des écotomes du sud vers le nord de quelques kilomètres, une baisse de la superficie de la forêt boréale allant de 5% à 40%, et une élévation de la superficie couverte par des arbres francs décidus entre 115% et 170%.

Gagnon (1997) du laboratoire d'écologie végétale de l'Université de Chicoutimi conçoit cependant qu'il est peu probable qu'il y ait un déplacement vers le nord de l'épinette noire puisque les lits de germination et la dispersion des graines ne sont pas liés directement à une hausse des températures. Il entrevoit des différences au niveau des feux de forêts et du comportement des organismes ravageurs des forêts. L'épinette noire domine tout le nord-est canadien, d'où l'importance d'en connaître la dynamique future.

Les ressources en eau, qui croît-on, abondent au Québec et sont utilisées à plus de 80% à des fins agricoles dans le monde, pourraient se faire de plus en plus rares au Québec dans le futur. Malgré des mesures de conservation et une utilisation plus efficace des ressources en eau au niveau commercial et domestique dans les pays industrialisés, de nouveaux usages pourraient amener une augmentation de la demande de l'ordre de 20 % (dont 5%, aux seuls fins d'arrosage), et ce, sans considérer le changement climatique et la tarification. La navigation serait modifiée dans les pays nordiques par les impacts sur les niveaux de périodes de basses eaux et de hautes eaux (Slivitzky, 1997).

Plusieurs scientifiques (IPCC, 1999) attribuent l'élévation des températures des 100 dernières années à la pollution anthropique et croient que les concentrations de CO₂ auront doublé d'ici 50 ans. Des scénarios de doublement de CO₂ effectif et de plus de vingt autres gaz à effet de serre pondérées selon leurs forçages radiatifs ont été élaborés. Trois modèles de circulations générales (MCG) prévoient de nouvelles conditions climatiques pour le Québec au courant

des 50 prochaines années (Environnement Canada, 1998). Au niveau des températures, ces modèles prévoient une tendance générale au réchauffement de +1°C à +6°C dans la partie septentrionale de la province. Ce réchauffement serait plus accentué lors de la saison hivernale et beaucoup plus important et intense dans le nord du Québec. Ensuite le sud du Québec recevrait, sous des conditions de doublement de CO₂ atmosphérique, des quantités de précipitation près ou légèrement au-dessus des normales saisonnières (de 0% à +10%). Les régions plus nordiques du Québec, pour leur part, recevraient entre 10% et 20% plus de précipitations spatiales (selon les régions de la province) et temporelles (selon les saisons)

En conclusion, les collectivités, l'économie et les ressources naturelles du Québec, comme celles des autres régions dans le monde, dépendent en partie, de la stabilité relative de la température et du climat. Vue l'étendue, la diversité des zones climatiques et la frontière Atlantique du Québec, une augmentation de la variabilité de la température pourrait avoir des incidences différentes, dépendamment des zones climatiques (Canada, 1997).

À court terme, si nous héritons d'un surplus monétaire au cours d'une année, il faudra l'économiser pour l'année suivante. Les dépenses publiques suivront les fluctuations des bouleversements occasionnés par les extrêmes de la températures aux environnement humains et naturels, ainsi qu'aux moyens technologiques que nous devons prendre pour rétablir les situations. Il faudra avoir une bonne idée de la variabilité de la température et bâtir en fonction des incertitudes. Par exemple, dans le cadre des programmes actuels de reboisement, il est possible de planter des arbres qui pousseront aussi facilement qu'aujourd'hui si les températures deviennent plus fluctuantes. Des règlements de zonage peuvent être établis afin d'empêcher tout projet de construction dans les régions côtières susceptibles d'être inondées en cas d'élévation du niveau de la mer. Les projets de construction ou de modernisation devraient tenir compte, à l'étape de la conception, des risques d'évolution vers un climat plus chaud, et notamment de la fréquence et de la gravité des inondations et des sécheresses (Canada, 1997).

CHAPITRE III

LA MESURE

3.1 Histoire de la mesure de la température

" Basé sur la dilatation des gaz, le thermomètre de Galilée, le premier dont nous ayons eu connaissance (fin du XV^e siècle), indiquait simplement des variations de température. Le premier thermomètre à donner une échelle de températures fut mis au point par un fabricant allemand d'instruments de physique, Daniel G. Fahrenheit, en 1714. Mais son échelle manquait de simplicité: pourquoi avoir attribué à la glace fondante 32°F et 212°F à l'eau atteignant l'ébullition? En 1742, le physicien et astronome suédois Anders Celcius propose une échelle plus commode, parce que centésimale allant de 0°C à 100°C ". (Germa, 1992)

Il existe deux techniques de mesure pour reconstituer le climat du passé. Il s'agit des mesures directes prises à l'aide de thermomètres surtout par les météorologues, et des mesures indirectes effectuées par les historiens et les paléoclimatologues. Les géologues, les géographes et les biologistes qui travaillent à reconstituer le climat du passé, le font à l'aide d'éléments radioactifs, des dépôts sédimentaires au fond des lacs et des océans, des fossiles, des colonies de coraux, des cercles de croissance des arbres, des carottes de glace prélevées dans les glaces de l'Arctique et de l'Antarctique, etc. Grâce aux journaux de bord des navires, aux archives familiales, et à d'autres données liées au climat telles que les dates des vendanges, le prix des céréales, la floraison des arbres et des arbustes, ou le gel des lacs et de canaux, les paléoclimatologues arrivent à compléter le tableau des variations climatiques.

Malgré toutes les découvertes réalisées en géologie et en histoire sur le climat du passé, les outils pour le mesurer, la quantité et le type d'informations recueillies diffèrent trop d'une période à une autre pour nous permettre de le reconstituer fidèlement. Plus les analyses correspondent à des périodes éloignées dans le temps et plus les informations deviennent peu nombreuses et imprécises. Les mesures instrumentales représentent les meilleures sources d'information sur les changements de la température, mais celles-ci remontent au mieux, à 300 ans. Ce n'est qu'au milieu du XVII^e siècle, avec la mise au point de thermomètres standardisés, que les premières données quantitatives apparurent. Malheureusement, celles-ci

sont difficilement exploitables, réparties de façon inégale à la surface de la Terre, ces mesures furent, le plus souvent, réalisées par des observateurs isolés, travaillant indépendamment les uns des autres, et avec des techniques qui n'ont cessé d'évoluer au cours des temps. Il n'existe que très peu de séries de mesures qui remontent au-delà de quelques dizaines d'années. La plus longue est celle reconstituée pour une localité d'Angleterre, par le Britannique Gordon Manley depuis 1659, de l'Université de Lancaster, à partir de mesures mensuelles de la température de l'air (Parker et Folland, 1992).

En Amérique du Nord, les plus longues séries de mesures débutent vers 1800, ce qui permet l'observation des oscillations à court terme et quelques oscillations intermédiaires. Cette courte période (100 ans) ne montre pas les grandes variations climatiques (Hidore, 1996). L'enregistrement simultané de la température sur une base inter annuelle sont effectivement depuis 100 ans, et celles de la haute atmosphère, depuis 50 ans.

3.2 Les relevés de la température au Canada

Au Canada, parmi les mesures indirectes, seuls les relevés météorologiques des 100 dernières années sont exploitables. La fiabilité et la régularité de l'outil de mesure (le thermomètre) à travers le temps, le nombre de postes, la fréquence et la régularité des échantillonnages, et la répartition des stations de mesure à travers tout le territoire québécois (du nord au sud), nous permettent d'étudier les oscillations sur un cycle court.

L'enregistrement des données de la « température » au Canada a été effectuée à plus de 5 000 stations à des périodes différentes. Aujourd'hui, seulement la moitié de ces stations sont encore en opération et quelques-unes d'entre-elles présentent des séries temporelles ininterrompues depuis 101 ans (1895). Au Québec par exemple, le nombre de stations a atteint un optimum de 500 dans les années 70 pour ensuite décroître jusqu'à 150 telles qu'on les connaît aujourd'hui. La fermeture ou la modification de plusieurs sites d'observations, des changements dans l'instrumentation et des procédures, des variations du nombre de stations à travers le temps et l'espace, et plus récemment, la réduction du réseau climatique traditionnel (observateurs volontaires) par l'instrumentation automatisée, ont occasionnés des discontinuités dans la lecture des paramètres, communément appelé « saut » ou « valeur manquante ». L'inspection des stations au début du siècle était rare ou non-existante. Les

thermomètres étaient placés à l'intérieur dans des enclos, sans aucun critère d'évaluation du milieu physique environnant. On pouvait retrouver alors des thermomètres au centre d'une végétation abondante, comme à côté d'édifices, et le temps d'observation était irrégulier. Les effets de l'irrégularité ont souvent été observés dans les séries de données du début du siècle et des changements soudains dans le calcul des moyennes, de la variabilité, et des valeurs extrêmes isolées qui reste inexpliquées.

Dans le but de contrer ces effets et d'accroître la fiabilité des analyses de tendance et de variabilité, de vérifier les modèles climatiques régionaux et nationaux, et ultimement pour pouvoir détecter un changement climatique, une base de données homogénéisées des températures maximales et minimales a été édifée. Celle-ci a été réalisée par Vincent et Gullett (1999) du Service de recherche scientifique sur l'environnement atmosphérique à Environnement Canada en utilisant une nouvelle technique d'homogénéisation relative basée sur deux modèles de régression qui seront décrites dans la section qui suit.

3.3 La technique d'homogénéisation canadienne

Homogénéiser signifie à prime abord, rendre harmonieux des éléments constitutifs de même nature, qui dans ce cas-ci, se caractérisent par des séries temporelles de la température. Les enregistrements de la température au Canada et au Québec comme partout dans le monde ont subi les contrecoups de contraintes liées aux déplacements de stations, à des modifications d'instruments, de disponibilité des observateurs, et d'un intérêt fluctuant de la part des gouvernements face à l'étude du climat qui s'est reflété à travers l'ouverture et la fermeture saccadée des stations de mesure. L'homogénéisation consiste à rendre uniforme les séries temporelles présentant des irrégularités (ou sauts) qui ne sont pas attribuable au climat lui-même mais à d'autres facteurs externes. Par exemple, un changement de procédure en 1961 dans tout le pays avait produit un saut décroissant dans les données de température annuelles oscillant entre 0,6 °C et 0,8 °C aux stations principales dans la partie est du pays. Dans le sud du Canada, un total de 172 stations (344 séries de températures maximales et minimales) ont été évaluées, et 36 % d'entre elles ont été classées homogènes (n'ont pas besoin d'ajustement). Dans le Nord, 38 stations ont été évaluées et 55% d'entre elles ont été classées homogènes (Vincent et Gullett, 1999).

Sur un total d'environ 2 500 stations opérationnelles au Canada, 2 000 d'entre-elles ont fait l'objet d'études afin de n'en sélectionner que quelques unes qui ont servi à constituer la « Base de Données Historiques des Températures au Canada ». Sur cette dernière, seulement 210 stations ont été retenues. Les critères de sélection ont été les suivants : distribution spatiale des stations de différentes régions climatiques à travers le pays, disponibilité de la plus longue série et la plus complète possible (habituellement moins de 5% de données manquantes) couvrant la période 1895-1995 (Vincent et Gullett, 1999).

Pour chacune des 210 stations de base et habituellement 4 à 6 stations voisines entourant celles-ci, l'enregistrement d'un saut résultant de la relocalisation d'une station ou d'un site était identifié et quantifié. Les stations voisines étaient originellement sélectionnées à l'intérieur d'un réseau de 50 à 100 km de chaque station de base afin d'accroître les chances qu'elles partagent le même régime climatique, excepté pour celles situées au nord du 60 ° parallèle où les stations voisines partageaient des distances allant de 300 km à 800 km. Une corrélation était ensuite effectuée entre une station de base et une station voisine. Si la corrélation n'était pas forte, c'est que : 1) les deux stations n'appartiennent pas au même régime climatique, ou que 2) l'une ou les deux stations contiennent des inhomogénéités. Des modèles de régressions ont été utilisés pour déterminer si la station de base est homogène; si elle ne l'était pas, la date et l'amplitude de l'inhomogénéité étaient étudiés à l'aide de rapports d'inspecteurs pour savoir si il y a eu un changement au courant de la période ou l'inhomogénéité a été observée (cependant on ne peut pas toujours trouver la réponse). La dernière étape consiste à ajuster les données mensuelles (Vincent, 1998).

Les sauts supérieur à 0,6°C étaient toujours ajustés, les sauts entre 0,4°C et 0,6°C ont été ajustés seulement avec le support historique de la station; et les sauts inférieurs à 0,4°C n'étaient pas ajustés parce qu'il n'étaient pas considérés suffisamment important. Ces valeurs ont été déterminé à la suite de test effectués à l'aide de données simulées. Les résultats montrent que les sauts de 0,75°C sont identifiés presque tout le temps, les sauts de 0,50°C le sont souvent, et les sauts plus petites que 0,25°C le sont rarement (Vincent, 1998).

À travers tout le réseau de stations du nord du Canada, les corrélations des valeurs annuelles avaient tendance à être élevées à cause de la stabilité du climat arctique. À l'opposé, les régions côtières et de montagne étaient sujettes à de grandes variations climatiques et la topographie était une considération majeure lors de la sélection des stations de base. Les stations situées en haute altitude étaient rarement retenues (Vincent, 1998).

3.4 La répartition géographique des stations au Québec

Il subsiste une disparité spatiale (altitude, latitude-longitude) et temporelle (année d'implantation et nombre de stations débutant la même année) des stations entre la zone nord et sud du 54^e parallèle Nord au Québec. La disparité spatiale se reflète d'abord par les différents niveaux d'élévation des stations représentés au Tableau 3.1. Malgré le fait que les analystes d'Environnement Canada ont voulu minimiser l'effet de l'altitude lors du choix des stations aux fins d'homogénéisation, il demeure qu'il existe un écart de 519 mètres entre la station la moins élevée (Inukjuak, localisée à 3 mètres d'altitude au nord ouest de la province) et la station la plus élevée (Schefferville, localisée à 522 mètres au nord est de la province). Parmi les vingt-deux stations à l'étude, quatre sont situées à plus de 300 mètres d'altitude, dix à 152 mètres et plus et douze à 87 mètres et moins, ce qui correspond à une élévation moyenne de 141 mètres. Ces différences peuvent se refléter dans les résultats. Évidemment, les stations localisées près des grands plans d'eau tel que le fleuve Saint-Laurent, le Golfe du Saint-Laurent et les Baies d'Hudson et d'Ungava, présentent une élévation inférieure aux stations situées à l'intérieur des terres.

Ensuite, dans l'ensemble du Canada, la localisation géographique des stations entre la zone nord et sud du 60^e parallèle Nord varie aussi mais suit une certaine régularité. Ainsi, la densité moyenne des stations au nord du 60^e parallèle correspond à une station par 100 000 km² de territoire tandis qu'au sud, elle représente une station par 30 000 km² de territoire. Au Québec, près de la moitié des stations se situent dans la Vallée du St-Laurent, là où se concentre plus de 80% de la population. Certaines stations ont été établies par le département d'Agriculture Canada en régions rurales (population inférieure à 10 000 habitants) afin de contrer l'effet de l'îlot urbain et seulement quelques-unes avoisinent les aéroports (la densité de la population se situe entre 10 000 et 50 000 habitants) (Vincent et Gullett, 1999).

Les différences temporelles se reflètent surtout au niveau de l'année d'implantation des 22 stations qui s'échelonnent de 1895 à 1946, c'est-à-dire sur plus de 52 ans. Le tableau 3.2 met en évidence ces différences. Les stations débutent à douze dates distinctes et les années 1895, 1910 et 1913 représentent trois années auxquelles sont associées l'ouverture de la moitié des stations. Mis à part les années 1914 et 1915, qui correspondent à l'ouverture de deux stations chacune, les sept stations restantes, qui sont aussi les plus tardives, débutent toutes à des dates différentes et sont majoritairement localisées au nord de 54 ° parallèle (4 stations sur 6). L'ouverture des stations situées à proximité du fleuve Saint-Laurent avait pour but de répondre aux besoins en eau des populations, alors que les stations du nord ont été édifiées surtout à des fins de prévision et de compréhension global du climat québécois, canadien, et même mondial (Vincent et Gullett, 1999).

3.5 Les données

Les données originales proviennent des Archives Nationales de données climatiques d'Environnement Canada. Aux fins de cette étude, nous avons utilisé la seconde base de données températures maximales et minimales moyennes mensuelles homogénéisées des 22 stations de la province du Québec réalisée par Vincent et Gullett (1999). Pour l'ensemble du Canada, la période 1945-1995 correspond à une époque de stabilité économique et administrative à travers le réseau de stations du nord et dans le Monde. Une deuxième période de stabilité correspond à celle qui s'est produite autour des années 1915 au milieu des années 1940 pour tout le sud du Canada. La base de données « Températures Historiques et Homogénéisées pour le Canada » contient les meilleures informations sur les températures mensuelles au Canada, et ces séries sont maintenant disponibles à la communauté de recherche sur les changements climatiques. Le seul traitement des données mensuelles homogénéisées « température maximale » et « température minimale » reconstituées des 22 stations, représentent plus de 50 232 données. Lorsqu'on ajoute les données « température moyenne » calculées à partir des températures maximales et minimales, cela augmente à 86 868 le nombre de données à traiter.

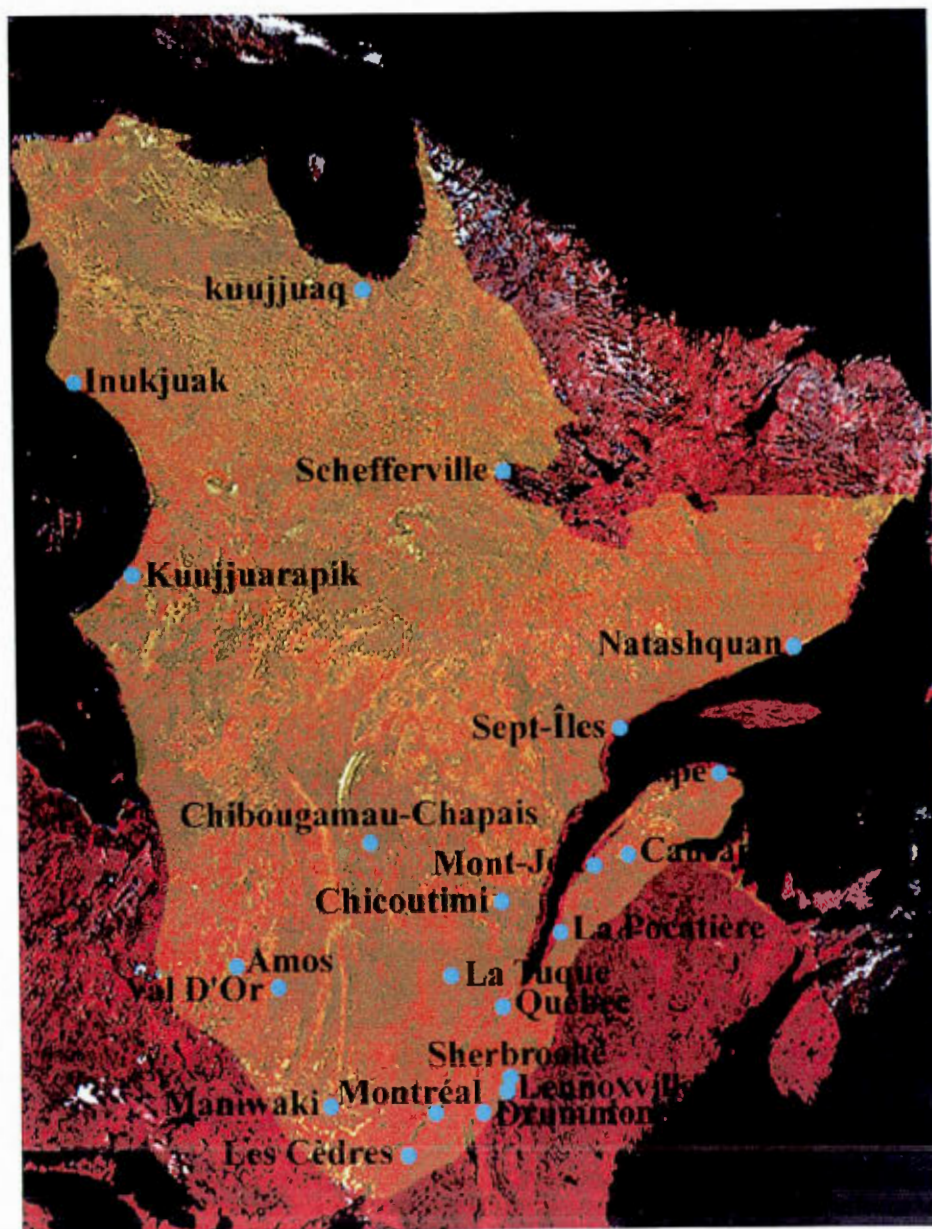


Figure 3.1 Carte des 22 stations météorologiques du Québec où les relevés de la température maximale et minimale moyenne mensuelle ont été homogénéisés (Vincent et Gullett, 1999)

La moitié des stations du Québec sont situées dans la Vallée du Saint-Laurent où l'altitude est généralement inférieure à 150 m. Les Basses-Terres du Saint-Laurent possèdent un relief de plaine, percées par endroit de quelques collines. Le relief du plateau de la Basse-Côte-Nord

où sont localisées deux stations est composé d'un plateau de 450 à 550 m d'altitude, qui décroît progressivement vers le sud-est et d'un massif de 750 m d'altitude (Québec, 1995).

Tableau 3.1 Emplacement géographique, périodicité et numéro d'identification des stations météorologiques

Nom de la station	Latitude		Longitude		Élévation mètres	Période	Station ID
	deg	min	deg	min			
1-Amos	48	34	78	08	310	1910-1995	7090120
2-Chicoutimi/Bagotville	48	20	71	00	159	1895-1995	7060400
3-Causapscal	48	22	67	14	168	1913-1995	7051200
4-MP/C/Chibougamau-Chapais	49	46	74	32	388	1910-1995	7091404
5-Drummondville	45	53	72	29	82	1913-1995	7022160
6-Gaspe	48	46	64	29	33	1915-1995	7052605
7-Inukjuak	58	27	78	07	3	1916-1995	7103282
8-Kuujuuaq	58	06	68	25	34	1942-1995	7113534
9-Kuujuarapik	55	17	77	46	21	1920-1995	7103536
10-La Pocatière	47	21	70	02	31	1913-1995	7054095
11-La Tuque	47	24	72	47	152	1910-1995	7074240
12-Lennoxville	45	22	71	50	159	1915-1995	7024280
13-Les Cèdres	45	18	74	03	47	1913-1995	7014290
14-Maniwaki 2/Maniwaki	46	23	75	58	170	1914-1995	7034480
15-Pointe-Pere/Mt-Joli	48	36	68	13	48	1895-1995	7055120
16-Montréal McGill	45	30	73	35	57	1895-1995	7025280
17-Natashquan	50	11	61	49	7	1914-1995	7045400
18-Québec/Québec	46	48	71	23	73	1895-1995	7016294
19-Schefferville	54	48	66	49	522	1943-1995	7117825
20-Sept-Iles	50	13	66	16	55	1939-1995	7047910
21-Sherbrooke/Sherbrooke	45	26	71	41	238	1903-1995	7028124
22-Val D'Or	48	04	77	47	337	1946-1995	7098600

(Vincent et Gullett, 1999)

Le tableau 3.2 met en évidence le nombre élevé de dates d'implantations différentes et l'étalement temporelle qui correspond a 52 années entre l'édification des premières stations en 1895 et de la dernière (Val D'or) en 1946.

Tableau 3.2 Multiplicité et étalement temporel des dates d'édification des stations météorologiques et de leur nombre

Année d'implantation	Nombre de stations	Villes
1 - 1895	4	Québec
		Pointe Père/Mt Joli
		Montréal McGill
		Chicoutimi/Bagotville
2 - 1903	1	Sherbrooke
3 - 1910	3	Amos
		Chibougamau-Chapais
		La Tuque
4 - 1913	4	Les Cèdres
		La Pocatière
		Drummondville
		Causapscal
5 - 1914	2	Maniwaki
		Natashquan
6 - 1915	2	Gaspé
		Lennoxville
7 - 1916	1	Inukjuak
8 - 1920	1	Kuujuarapik
9 - 1939	1	Sept Iles
10 - 1942	1	Kuujuaq
11 - 1943	1	Schefferville
12 - 1946	1	Val D'Or

(Gullet et Vincent, 1999)

CHAPITRE IV

DÉMARCHE ANALYTIQUE

La démarche méthodologique a débuté au mois de septembre 1998. La première étape a consisté à développer une méthodologie à partir de données générées aléatoirement sur Excel. Nous avons produit quatre séries de cent données aléatoires (pour représenter les 100 années à l'étude) avec une moyenne de zéro et un écart-type de un, et nous avons observé le comportement de chacune des courbes de variabilité à l'aide de l'écart-type mobile 10 ans, 20 ans, 30 ans et 50 ans pour nous familiariser à l'analyse visuelle des tendances.

La seconde étape a été de travailler avec les données "températures maximales moyennes mensuelles" à la Pocatière, une station choisie au hasard. Tout le travail de recherche pratique sur la moyenne mobile, l'écart-type mobile et sur les saisons a vraiment débuté à ce moment là. Ainsi, nous avons pu nous rendre compte en traçant des courbes de moyennes mobiles 10 ans, 20 ans, 30 ans, 40 ans et 50 ans, que l'intervalle de 30 ans reflétait mieux les tendances des trois périodes établies par hypothèses sur l'échelle de 100 ans. Bien que chaque courbe d'intervalle de temps révèle une information différente, celle de 30 ans permet de lisser la courbe sans enlever ou donner trop de détails, ce qui a l'avantage de faire ressortir les tendances générales au réchauffement ou au refroidissement.

4.1 Rappel de l'objectif et des hypothèses de la recherche

Objectif principal : déterminer si le réchauffement qu'a connu le Québec au courant du XX^e siècle, a engendré une plus grande variabilité inter annuelle (saisonnière), et inter mensuelle des températures.

Hypothèse 1 : le climat actuel est plus variable qu'au début du siècle

Hypothèse 2 : il existe une corrélation positive entre la température et la variabilité

Hypothèse 3 : la période comprise entre 1940 et 1970 a été la moins variable du siècle.

4.2 Les influences géographiques

Le Québec présente un relief plutôt uni. En effet, 7% seulement des élévations de la province atteignent plus de 600 mètres, et aucune barrière montagneuse n'est suffisamment élevée pour freiner la circulation des courants météorologiques. Le Québec présente trois principales formes de relief : le plateau Laurentien, les Appalaches et les Basses-Terres du Saint-Laurent. Le plateau Laurentien fait partie du Bouclier Laurentien (immense étendue de collines parsemées de milliers de lacs). Le Bouclier couvre 80 p. cent de la province. Ses sommets les plus élevés atteignent plus de 900 mètres dans le parc des Laurentides, au nord de Québec. Le sommet de l'escarpement reçoit de 1 400 à 1 600 mm de précipitations chaque année; c'est l'un des versants les plus arrosés au Canada. Les Appalaches passent par le sud des Cantons de l'Est et s'étendent jusqu'à la péninsule gaspésienne. La région se compose d'un ancien plateau d'environ 400 mètres d'altitude avec des sommets plus élevés et des vallées profondes, alignées dans le sens sud-ouest nord-est. Les Basses-Terres du Saint-Laurent sont limitées par les Appalaches et le Bouclier canadien, qui vont de Québec jusqu'à la frontière de l'Ontario (Canada, 1990).

4.3 Division de la province du Québec en quatre zones géographiques

La première étape méthodologique consiste à diviser la province du Québec en quatre grandes zones géographiques à l'intérieur desquelles seront représentées les 22 stations. Notre subdivision se rapproche des régions écoclimatiques établies par le comité canadien de classification du territoire (Québec, 1998). Ce modèle peut représenter en fait une juxtaposition de plusieurs cartes telle que la carte des zones de végétation du Québec, la carte des climats du Québec, la carte des provinces naturelles du Québec du gouvernement du Québec, puisqu'il prend en compte les différents facteurs pouvant influencer les températures. Les zones que nous avons créées permettent de rassembler les stations en fonction de plusieurs facteurs géographiques (type de relief, proximité de l'océan, l'effet de la latitude-longitude, milieux urbains versus milieux ruraux), pouvant influencer les températures du milieu ambiant. Dans le tableau 4.1 qui suit, le tracé limitant les frontières entre chaque zone, ne représente pas un quadrilatère parfait tel que le veut les quadrats définis sur les cartes. Les degrés latitude-longitude attribués correspondent donc à la limite la plus à l'Est et à l'Ouest en

ce qui à trait à la longitude, et à la limite la plus au Nord et au Sud en ce qui à trait à la latitude.

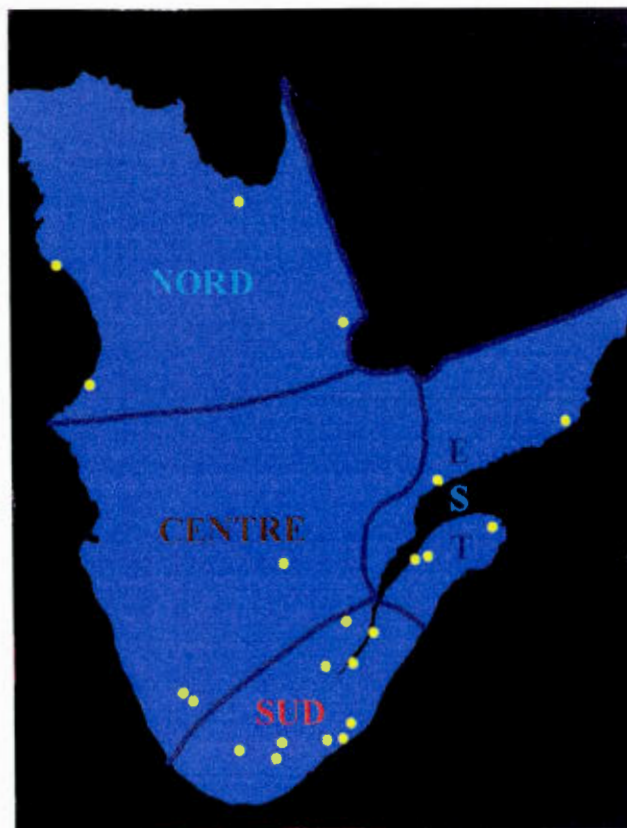


Figure 4.1 Carte des divisions géographiques du Québec

Tel que l'indique le tableau 4.1 à la page suivante, Inukjuak (1916) représente la plus ancienne station du Nord du Québec; Amos (1910) et Chibougamau-Chapais (1910) les stations les plus anciennes du Centre; Chicoutimi/Bagotville (1895), Québec (1895), La Tuque (1895) et Montréal (1895), les stations les plus anciennes du Sud; et Pointe-Père/Mont-Joli (1895), celles de l'Est du Québec. Les stations débutant plus tardivement dans chacune des zones ont été ramenées, grâce à l'équation de la droite de régression des moindres carrés, au niveau de la plus ancienne station de chacune des zones. Ainsi les données des stations Kuujjuak, Kuujuarapik et Schefferville du Nord du Québec, qui débutent respectivement en 1942, 1920 et 1943, ont été reconstituées jusqu'en 1916. Donc les

séries du Nord et du Centre du Québec échelonnent sur 80 et 86 ans, tandis que celles du Sud et de l'Est du Québec ont pu être reconstituées jusqu'au début de l'implantation des stations, soit depuis 1895, ce qui équivaut à 101 ans.

Tableau 4.1 Délimitation latitudinale et longitudinale des zones géographiques

Zones géographiques et intervalle de temps	Latitude approximative	Longitude approximative	Nb de stations	No. des stations	Nom des stations
Nord 1916 à 1995 (80 ans)	54 °N à 62 °N	63 °O à 80 °O	4	7	Inukjuak (1916)
				8	Kuujjuak (1942)
				9	Kuujjuarapik (1920)
				19	Schefferville (1943)
Centre 1910 à 1995 (86 ans)	47 °N à 54 °N	67 °O à 80 °O	3	22	Val D'Or (1946)
				1	Amos (1910)
				4	Chibougamau-Chapais (1910)
Sud 1895 à 1995 (101 ans)	45 °N à 47 °N	70 °O à 80 °O	10	10	Montréal (1895)
				13	Les Cèdres (1913)
				21	Sherbrooke (1903)
				12	Lennoxville (1915)
				5	Drummondville (1913)
				14	Maniwaki (1914)
				18	Québec (1895)
				11	La Tuque (1910)
				16	La Pocatière (1913)
				9	Bassiville (1895)
Nord 1895 à 1995 (101 ans)	47 °N à 53 °N	57 °O à 70 °O	5	17	Natashquan (1914)
				20	Sept Îles (1939)
				6	Gaspé (1915)
				15	Mont-Joli (1895)
				3	Causapscal (1913)

4.4 Établissement de trois périodes distinctes

Après observation de la courbe des données "température" aux stations " Les Cèdres ", " La Pocatière ", et " Québec ", de 1895 à 1995, à la manière de certains chercheurs d'Environnement Canada, nous croyons aussi que la période comprise entre 1940 et 1970 a été la moins variable du siècle. Étant donné que notre troisième hypothèse reprend cette affirmation, et que pour la valider nous avons dû diviser l'échelle du temps en trois période distinctes, soit 1895-1940 (46 ans), 1941-1970 (32 ans) et 1971-1995 (25 ans), nous avons aussi choisi de conserver ces mêmes intervalles pour argumenter la première hypothèse. La première hypothèse voulant que le climat actuel soit plus variable qu'au début du siècle, ne comprenait en fait aucune période de temps pour refléter ce que nous appelions le début du siècle, ni ce que nous qualifions de période actuelle. Il fallait donc créer des "sous périodes" pour expliquer les tendances au réchauffement et au refroidissement et les tendances à l'augmentation et à la diminution de la variabilité à l'intérieur de ces cent-une années. La question soulevée était donc " quels critères utiliser pour délimiter ces périodes? " Après plusieurs observations de la courbe des températures maximales, minimales et moyennes annuelles aux premières stations que nous avons analysé, c'est-à-dire "La Pocatière", "Les Cèdres" et "Québec", nous avons aussi remarqué une démarcation évidente des oscillations de la température et des tendances au réchauffement et au refroidissement qui coïncidait très bien avec l'observation faite par les chercheurs d'Environnement Canada. Également, les courbes d'écart-type mobile (30 ans) et de moyenne mobile (30 ans) venaient confirmer nos observations quant aux tendances de la variabilité au cours de chacune des périodes. Voilà pourquoi nous avons choisi de conserver les mêmes intervalles de temps pour expliquer le comportement de la variabilité des températures au Québec au XX^e siècle. De plus, puisque ces trois intervalles représentent des périodes oscillant autour de 30 ans, nous considérons que le nombre de valeurs représentant chaque "échantillon" de période pour l'analyse des résultats, était suffisamment homogène (approximativement le même nombre d'éléments, d'années) pour être comparé.

Afin de répondre à la troisième hypothèse, nous avons divisé l'échelle du temps 1895-1995 en trois périodes distinctes, soit 1895-1940 (46 ans; pour les stations débutant à cette date), 1941-1970 (32 ans) et 1971-1995 (25 ans).

L'écart-type calculé à partir des données moyennes annuelles comprises dans chacune de ces trois périodes, a été utilisé pour déterminer la variabilité inter annuelle. Également, l'écart-type des données moyennes mensuelles comprises dans chacune de ces trois périodes, a été utilisé pour déterminer la variabilité inter mensuelle.

Afin de valider la première hypothèse, nous avons utilisé l'écart-type mobile 30 ans. Après plusieurs essais avec la moyenne mobile et l'écart-type mobile 10 ans, 20 ans, 30 ans, 40 ans et 50 ans, l'échelle de 30 ans a été retenue. Celle-ci permet une meilleure visualisation de la tendance au réchauffement et au refroidissement (courbe de la moyenne mobile) et de l'augmentation et la diminution de la variabilité (courbe de l'écart-type) à chacune des trois périodes.

4.5 Reconstitution des séries chronologiques avec la plus ancienne station de chacune des zones

Étant donné que dans chacune des zones géographiques les stations ne débutent pas toutes au même moment, il a fallu effectuer des corrélations entre les stations de chacune des zones afin de reconstituer des séries chronologiques au niveau de la plus ancienne station. Cette méthode nous permet de ne pas perdre de vue le début du siècle qui peut venir changer complètement la tendance telle que le suppose notre objectif et les deux premières hypothèses. Les corrélations entre les stations de chacune des zones se sont avérées significatives à 99,5% sauf pour l'été et l'automne dans le sud du Québec. Par exemple, dans le nord du Québec, toutes les stations ont été ramenées au niveau de la plus ancienne station, c'est-à-dire Inukjuak qui débute en 1916. Sans cela, les trois autres stations : Kuujuak, Kuujjuarapik et Scherfferville débutent respectivement en 1942, 1920 et 1943, et aurait pu nous faire perdre la tendance du début du siècle qui s'avère être un élément crucial pour notre recherche tel que le veut l'objectif principal et des trois hypothèses de la recherche.

La première étape a consisté à calculer le coefficient de corrélation entre chacune des stations comprises dans chacune des zones, et la station la plus ancienne. Lorsque la relation entre X (variable explicative ou indépendante) et Y (variable expliquée ou dépendante) est linéaire et forte, c'est-à-dire proche de +1 ou -1, les points du nuage sont proches d'une droite de pente

non nulle. Les résultats des corrélations se sont avérés être supérieur à 0,9 dans 39% des cas (7/18 stations), supérieur à 0,8 dans 44% des cas (8/18 stations), et supérieur à 0,7 dans 17% des cas (3/18 stations, excepté dans le Nord en été où les coefficients ont été inférieur). Les séries temporelles présentant un coefficient de corrélation inférieur à 0,7 n'ont pas été reconstituées. Des valeurs inférieures à 0,7 ont été observées seulement dans le Nord du Québec en été, soit aux mois de juillet et août entre Inukjuak (station de référence) et les autres stations, Kuujjuarapik, Kuujuaq et surtout Shefferville. De façon générale, le niveau de signification excédait 99,5%, ce qui démontre un lien très fort entre les températures de la station de base (la plus ancienne) et les stations voisines d'une même zone géographique. La corrélation la plus forte se situe entre les stations les Cèdres et Montréal.

Suite à cela, Péron (1999) a procédé à la reconstitution de « l'intervalle de temps manquant » des températures moyennes mensuelles des stations voisines à l'aide de l'équation de la droite de régression des moindres carrés $y = a + bx$, où « b » représente la pente de la droite, et « a » l'ordonnée à l'origine (Tableau 4.2). Le principe des moindres carrés est le principe selon lequel on choisit, parmi toutes les droites possibles, celle qui minimise la somme des carrés des distances verticales (Alalouf et al., 1990). Cette équation linéaire permet d'estimer la valeur de Y qui correspond à une valeur de X données. Il suffit de remplacer X par la valeur en question dans l'expression $y = a + bx$ pour trouver les valeurs manquantes des séries temporelles. Avant de procéder à la reconstitution des séries chronologiques manquantes, la température moyenne mensuelle a d'abord été calculée à chacune des stations à l'aide des températures maximales et minimales moyennes mensuelles.

Tableau 4.2 Équations des droites de régression dérivées des corrélations effectuées entre les séries chronologiques des stations de base et des stations de référence à chacune des zones géographiques

Nord _ station de référence : Inukjuak – 1916

Nom de la station	Équation	Coefficient de corrélation entre la station de base et la station de référence
Kuujjuak	$y = 0.8264x - 0.0279$	0.86
Kuujjuarapik	$y = 0.8186x + 1.0719$	0.90
Shefferville	$y = 0.7214x - 0.0128$	0.80

Centre _ station de référence : Amos – 1910

Nom de la station	Équation	Coefficient de corrélation
Chibougamau	$y = 1.0007x - 2.2157$	0.88
Val d'Or	$y = 0.8578x + 0.7468$	0.94

Sud _ station de référence : Montréal – 1895

Nom de la station	Équation	Coefficient de corrélation
Québec	*	0.94
Chicoutimi	*	0.70
Sherbrooke	$y = 0.9582x - 2.5778$	0.94
La Tuque	$y = 0.9126x - 3.5955$	0.88
La Pocatière	$y = 0.8528x - 2.0876$	0.87
Les Cèdres	$y = 1.0243x - 1.1235$	0.96
Drummondville	$y = 1.0205x - 1.7341$	0.92
Maniwaki	$y = 0.8583x - 2.2996$	0.85
Lennoxville	$y = 0.9429x - 1.5584$	0.94

Est _ station de référence : Mont-Joli – 1895

Nom de la station	Équation	Coefficient de corrélation
Causapscal	$y = 0.9933x - 1.0909$	0.88
Natashquan	$y = 0.8321x - 1.7914$	0.71
Gaspé	$y = 0.9881x - 0.3021$	0.80
Sept-îles	$y = 1.0191x - 2.5148$	0.76

*caractérise les stations voisines dont l'enregistrement des températures a débuté au même moment qu'à la station de base et dont les données n'ont pas été reconstituées

À la suite des reconstitutions, les températures moyennes annuelles saisonnières ont été calculées comme suit: L'hiver contient les mois de décembre de l'année précédente, puis les mois de janvier et février de l'année en cours. Pour le premier hiver (1895 dans le Sud et l'Est, 1910 pour le Centre, et 1916 pour le Nord), seuls les mois de janvier et février ont été pris en compte. Les données du mois de décembre 1995 n'ont donc pas été utilisées. Les mois de mars, avril et mai constituent le printemps; Juin, Juillet et Août, l'été; et septembre, octobre et novembre, l'automne.

4.6 Calcul de la variabilité inter annuelle (saisonnière), et inter mensuelle

La variabilité inter annuelle et saisonnière est établie à l'aide de l'écart-type calculé à partir de la température moyenne annuelle, tandis que la variabilité inter mensuelle se mesure avec l'écart-type des températures moyennes mensuelles à l'intérieure d'une année.

À titre d'exemple, la simple observation de la courbe des températures moyennes annuelles à Inukjuak dans le Nord du Québec de 1916 à 1995 ne nous permet pas de déterminer à quel moment débute et se termine le réchauffement et le refroidissement. Également, il est difficile de déterminer à partir de quel moment le climat devient plus ou moins variable par simple observation de l'amplitude des fluctuations. Même un œil averti peut difficilement évaluer ce genre d'informations, c'est pourquoi il existe deux techniques de mesure qui nous permettent d'atténuer ces oscillations et de faire ressortir les tendances au réchauffement et au refroidissement, et à l'augmentation et des diminutions de la variabilité. Il s'agit de la moyenne mobile et de l'écart-type mobile. Le terme mobile indique un déplacement. La moyenne mobile et l'écart-type mobile sont des moyennes et des écarts-types calculés sur de courtes périodes (dans ce cas-ci 30 ans) et qui se déplacent à l'intérieur d'un intervalle de temps plus long.

4.6.1 La moyenne mobile

" La moyenne mobile est une façon simple et naturelle de procéder au lissage d'une série chronologique trop cahoteuse. Elle consiste à remplacer chaque observation X_t de la série par une nouvelle valeur, notée \bar{X}_t , qui est la moyenne de plusieurs observations voisines. Nous savons que la moyenne de plusieurs observations est beaucoup plus stable qu'une observation individuelle. Cette nouvelle série x_1, x_2, \dots, x_t porte le nom de *moyenne mobile*" (voir App. A., p. 77) (Alalouf, Labelle et Ménard, 1990, p. 306). Plus on augmente le nombre d'éléments dans le calcul de la moyenne mobile, plus le lissage sera accentué.

$$\bar{X}_t = \left(\sum_{i=-r}^r c_i X_{t+i} \right) / \left(\sum_{i=-r}^r c_i \right).$$

$c_i = 1$

(Alalouf, Labelle et Ménard, 1990, p. 307)

Pour un meilleur lissage, on peut calculer la moyenne d'un grand nombre d'observations consécutives (la période). Toutefois plus ce nombre est important, plus on augmente le risque de perdre des informations significatives. En trente ans le climat change peu, ce qui empêche le risque de lier les événements trop éloignés. La moyenne mobile permet donc de déterminer les tendances au réchauffement et au refroidissement au cours des trois périodes.

Que l'on emploie les valeurs mensuelles ou annuelles de la température, la moyenne mobile reste la même. Ceci respecte le corollaire mathématique qui veut que la moyenne des moyennes d'une série d'observations de trente années par exemple, soient équivalentes à la moyenne de ces mêmes observations prises individuellement. Par exemple, la moyenne des valeurs annuelles des trente premières années est égale à la moyenne des valeurs mensuelles des trente premières années.

4.6.2 L'écart-type mobile

L'écart-type (s) a été utilisé pour mettre en évidence les extrêmes de la température en mettant au carré les écarts à la moyenne.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

(Baillargeon, 1984, p.42)

La variabilité inter mensuelle a été calculée en utilisant les températures moyennes mensuelles. Nous avons calculé l'écart-type mobile (30 ans) inter mensuel avec les températures moyennes mensuelles de chacun des douze mois des trente premières années (Appendice A, p.77). Il s'agit donc d'un écart-type mobile inter mensuel intra 30 ans, et non d'un écart-type inter mensuel calculé à l'intérieur d'une seule année et ensuite moyennée sur 30 ans.

Ex₁ : La variabilité inter mensuelle sur 30 ans (section Nord)

1-Nous calculions la moyenne de l'ensemble des températures moyennes mensuelles des douze mois constituant les années 1916 à 1945 inclusivement; 1917 à 1946 inclusivement; 1918 à 1947 inclusivement; ainsi de suite pour obtenir la moyenne mobile 30 ans (*voir* App.A, p.83).

2-Nous calculions l'écart entre la température du mois de janvier de chacune des années par exemple, et la moyenne mobile obtenue pour chaque bloc de 30 ans du mois de janvier (1916-1945; 1917-1946, ...) $(X_i - \bar{X})$. Nous répétions la même procédure pour le mois de février, mars, etc.;

3-L'écart de chacune des valeurs mensuelles à la moyenne mobile était ensuite mis au carré $(X_i - \bar{X})^2$;

4-La somme des carrés des écarts à la moyenne mobile $\sum_i (X_i - \bar{X})^2$ était divisée par le nombre d'éléments (30 ans-1=29). Nous obtenions finalement l'écart-type inter mensuel en faisant la racine carrée de cette dernière valeur (équation p.49).

Ex₂ : La variabilité inter annuelle sur 30 ans (section Nord)

1-Nous calculions la moyenne des températures moyennes annuelles de 1916 à 1945 inclusivement; ensuite de 1917 à 1946 inclusivement; ainsi de suite pour obtenir la moyenne mobile;

2-Nous calculions l'écart entre chacune des températures moyennes annuelles comprises à l'intérieure de la période de 30 ans et la moyenne mobile 30 ans $(X_i - \bar{X})$;

3-L'écart de chacune des températures moyennes annuelles à la moyenne mobile était mis au carré $(X_i - \bar{X})^2$;

4-La somme des carrés des écarts à la moyenne mobile $\sum_i (X_i - \bar{X})^2$ était divisée par le nombre d'éléments (30 ans, donc 30 valeurs -1 = 29 valeurs) .

La variabilité inter annuelle correspond tout simplement à l'écart-type calculé à partir des températures moyennes annuelles sur 30 ans, tandis que nous avons utilisé les températures moyennes mensuelles à l'intérieur de 30 ans pour obtenir l'écart-type inter mensuel. Également, la variabilité saisonnière correspond à l'écart-type des températures moyennes annuelles (des trois mois de chacune des saisons) sur 30 ans, c'est pourquoi on la nomme "variabilité inter annuelle saisonnière". De la même manière que l'écart-type mobile inter annuel, les tendances de la variabilité saisonnière au cours des trois périodes, se représentent bien à l'aide de l'écart-type mobile inter annuel saisonnière 30 ans.

4.7 Méthodes de validation des hypothèses

La première hypothèse qui consiste à déterminer si le climat actuel est plus variable qu'au début du siècle, a été validée à l'aide de la visualisation des courbes de tendances de l'écart-type mobile inter annuelle (saisonnière) 30 ans, et inter mensuelle, au cours des trois périodes. Aussi, nous avons calculé l'écart-type inter annuel et inter mensuel pour chacune des périodes.

La deuxième hypothèse à travers laquelle nous pensions qu'il existe une corrélation entre la température et la variabilité, a été déterminée en effectuant des corrélations entre la moyenne mobile (30 ans) et l'écart-type mobile (30 ans), au niveau inter annuel et inter mensuel. Ces corrélations ont permis de déterminer la force du lien existant entre la température et la variabilité, et d'observer quelle tendance prend la variabilité lorsque la température augmente ou diminue.

Des comparaisons de l'écart-type moyen à chacune des trois périodes (1895-1940; 1941-1979; 1971-1995) telle que déjà calculée lors de la validation de la première hypothèse, au niveau provincial, zonal et saisonnier ont été réalisées afin de confirmer ou infirmer la

troisième hypothèse. Cette dernière consistait à vérifier si la période comprise entre 1940 et 1970 a été la moins variable du siècle.

CHAPITRE V

LE RÉCHAUFFEMENT QU'A CONNU LE QUÉBEC AU XX^e SIÈCLE A-T-IL RENDU LES TEMPÉRATURES PLUS VARIABLES ?

Les résultats sont présentés par ordre décroissant d'importance de la superficie territoriale couverte, en réponse à l'objectif principal et de la validation des trois hypothèses de la recherche. Les statistiques des températures moyennes annuelles et mensuelles à l'échelle provinciale sont donc présentés en premier. Ensuite, s'ajouteront ceux obtenus à chacune des zones géographiques. Les tendances annuelles saisonnières zonale ont été présentées à la toute fin. Des résultats généraux tels que les températures et les écarts-types moyens globaux et périodiques à chacune des stations météorologiques seront aussi montrés. Le rejet ou l'acceptation des hypothèses et de l'objectif de la recherche sont basés uniquement sur les résultats obtenus à l'échelle provinciale. Bien que de façon générale nous ayons conservé l'ordre dans lequel les hypothèses ont été émises, la figure 5.1 donne les éléments de réponses de la première et de la troisième hypothèse en même temps. La validation de la deuxième hypothèse a été effectuée en dernier. L'objectif principal nécessite l'intervention de trois figures (5.1 à 5.3 inclusivement), nous obligeant d'y répondre en deux parties. Mêmes si plusieurs autres analyses ont été effectuées avec ces mêmes données, les graphiques sélectionnés ci-après servent de support visuel à la vérification de l'objectif et des hypothèses de la recherche. La présentation graphique a été réduite au maximum afin d'alléger le texte et de centrer la discussion sur ce qui nous semblait prioritaire. Les abréviations "T", "É-t ia", et "É-t im" ont été couramment employées pour désigner dans l'ordre : la température, l'écart-type inter annuel, et l'écart-type inter mensuel.

5.1 Observations générales de la courbe d'oscillations des températures moyennes annuelles des 22 stations de la province de Québec, de 1916 à 1995

La température moyenne de la province du Québec sur la période de 80 ans étudiée (1916 à 1995) est de 0,21°C. Cette moyenne, inclut les données constituées des séries chronologiques, dans chacune des zones géographique. Inukjuak, la station la plus ancienne de la section Nord du Québec, ne débute qu'en 1916 et contribue à positionner cette zone au dernier rang quant à la date d'édification, en comparaison aux trois autres zones

géographiques. Également, Amos et Chibougamau-Chapais, les deux plus anciennes stations de la section Centre, ne débutent qu'en 1910. Cela ne nous permet pas de calculer la moyenne globale provinciale sur la période de 101 ans, soit de 1895 à 1995, comme nous l'aurions souhaité. Il en est de même au niveau des écarts-types. Les moyennes des écarts-types mobile inter annuel et inter mensuel sont respectivement de 0,69 et de 11,29. La moyenne des températures moyennes annuelles à chacune des périodes correspond à $-0,28^{\circ}\text{C}$ de 1916 à 1940, à $0,47^{\circ}\text{C}$ de 1941 à 1970, et à $0,38^{\circ}\text{C}$ de 1971 à 1995. Les écarts-types inter annuel et inter mensuel périodiques sont de façon consécutive : de 0,78 et de 11,63 la première période; de 0,56 et 11,16 la deuxième période, et de 0,74 et 11,41 la dernière période.

La droite de tendance au réchauffement tracée sur la figure 5.1 à la page suivante ne démontre pas la tendance à chacune des périodes mais plutôt sur toute la période considérée. D'autres analyses de tendances individuelles à chacune des périodes, qui ne sont pas présentées ici, montrent que les températures ont augmenté de façon importante à la première période, alors qu'elles étaient stables au courant des deux dernières périodes décrites par hypothèses. Cependant, nonobstant le critère "période" imposée par hypothèse, la courbe d'oscillations des températures moyennes annuelles subit quatre tendances distinctes, dont les deux dernières sont moins évidentes et se produisent entre 1972 et 1995. Ces tendances de hausses et de baisses consécutives de la température sont plus ou moins importantes et sont visuellement perceptibles sans la moyenne mobile.

En ne prenant pas en considération les trois périodes établies par hypothèse, la hausse des températures la plus prononcée du siècle s'est effectuée entre 1917 et 1961. Une élévation de $1,25^{\circ}\text{C}$ a été enregistrée au niveau provincial en calculant la différence entre la moyenne des dix premières années les plus froides, 1917 à 1926, et les dix premières années les plus chaudes, 1952 à 1961 (période de 35 ans entre le milieu de ces deux moyennes). Les deuxième et troisième tendances observées, se définissent d'abord par un refroidissement de $0,61^{\circ}\text{C}$, correspondant au niveau de température la plus froide des années 1963 à 1972 (période de 12 ans entre 1961 et 1972), et ensuite par un second réchauffement de $0,54^{\circ}\text{C}$ jusqu'en 1979-1988 (période de 17 ans entre 1972 et 1988). En l'espace de seulement quatre ans, la quatrième tendance a été une baisse de $0,42^{\circ}\text{C}$, caractérisant la période 1985 à 1994.

Or, la hausse presque constante de la température durant 35 ans au début du siècle, marque une tendance exemplaire et inégalée au XX^e siècle.

5.2 Vérification partielle de l'objectif de la recherche

À elle seule, la figure 5.1 répond en partie à l'objectif principal de la recherche et à la première et la troisième hypothèse. L'objectif principal, qui consiste à " déterminer si le réchauffement qu'a connu le Québec au courant du XX^e siècle a engendré une plus grande variabilité inter annuelle et inter mensuelle " se vérifie ici en partie. La figure 5.1 ne montre pas la valeur de la force du lien (du coefficient de corrélation) entre la température moyenne annuelle (moyenne mobile) et la variabilité inter annuelle et inter mensuelle (écart-type mobile inter annuel et inter mensuel). Cette dernière sera démontré aux figures 5.2 et 5.3. La figure ci-dessous nous permet simplement de déduire, à l'aide des données chiffrées, les informations suivantes :

- Le réchauffement n'a pas été constant tout au long des trois périodes étudiées.
- La variabilité a plutôt eu tendance à diminuer avec le réchauffement au courant des deux premières périodes.
- La troisième période (1971 à 1995) se caractérise par un revirement total de ce que nous avons connu les cinquante-cinq premières années. Depuis 1970, au fur et à mesure que la température a augmenté, la variabilité s'est mise à croître elle aussi, atteignant un niveau presque identique à celui du début du siècle. Cet état de fait se remarque d'ailleurs par les oscillations très prononcées et plus rapprochées qu'aux deux autres périodes, immédiatement après l'année 1972.

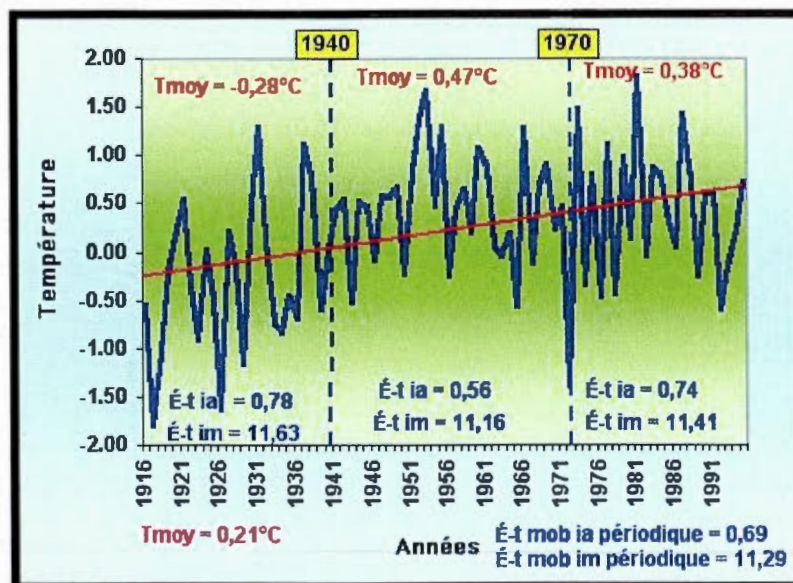


Figure 5.1 Températures moyennes annuelles des 22 stations de la province de Québec de 1916 à 1995. (Les abréviations Tmoy, É-t ia, et É-t im signifient dans l'ordre: Température moyenne, Écart-type inter annuel, et Écart-type inter mensuel)

À première vue, lorsqu'on évalue toute la série chronologique, il ne semble pas exister de lien entre la température et la variabilité. Cependant, lorsqu'on regarde les trois parties distinctement, il paraît exister une corrélation négative entre la température et la variabilité au courant des deux premières périodes, et une corrélation positive durant la dernière période. Pour pouvoir répondre entièrement à cet objectif, il faut faire intervenir les figures 5.2 et 5.3 qui nous permettent de visualiser les tendances des courbes de la moyenne mobile (des températures moyennes annuelles) et de l'écart-type mobile (des températures moyennes annuelles) inter annuel et inter mensuel 30 ans normalisées à zéro (la moyenne globale soustraite des valeurs annuelles), ainsi que leur coefficient de corrélation. Étant donné que ces figures nous permettent aussi de vérifier la deuxième hypothèse, la seconde partie de la réponse à l'objectif principal sera donnée au même moment.

5.3 Validation de la première hypothèse

La première hypothèse qui consiste à prétendre que " le climat actuel est plus variable que celui du début du siècle " est rejetée. Telle qu'indiquée à la figure 5.1, l'écart-type inter annuel de la dernière période est inférieur de 0,04 à celui du début du siècle, et l'écart-type inter

mensuel de la dernière période est aussi inférieur de 0,22 à celui du début du siècle. Le climat de 1971 à 1995 a donc été moins variable que celui du début du siècle, mais de seulement 5 % au niveau inter annuel et de 1% au niveau inter mensuel.

5.4 Validation de la troisième hypothèse

La troisième hypothèse qui prétend que " la période comprise entre 1941 et 1970 a été la moins variable du siècle " est cependant acceptée puisque effectivement les valeurs de l'écart-type révèlent une baisse de 0,56 au niveau inter annuel et de 0,47 au niveau inter mensuel par rapport à celui du début du siècle, et un écart-type inter annuel inférieur de 0,18 et de 0,25 au niveau inter mensuel par rapport à celui de la dernière période. En pourcentage, cela signifie qu'au niveau inter annuelle, la période 1941 à 1970 a été 28% moins variable qu'à la première période et 24 % moins variable qu'à la dernière période. Au niveau inter mensuel, la deuxième période a été moins que la première période de 4%, et moins variable que la dernière période de 2%. La variabilité inter mensuelle est pratiquement restée la même sur toute la période, alors qu'il y a eu des fluctuations importantes à l'intérieur même des tendances de la variabilité au courant des trois périodes à l'étude.

5.5 Validation complète de l'objectif principal et de la deuxième hypothèse

Les graphiques 5.2 et 5.3 permettent de compléter la vérification de l'objectif principal et d'infirmer la deuxième hypothèse. L'aplanissement des oscillations des courbes de la température et donc de l'écart-type, fait ressortir l'idée que le réchauffement généralisé qu'a connu le Québec au courant du XX^e siècle, n'a pas engendré une augmentation de la variabilité, mais plutôt une stabilisation de la variabilité inter annuelle et une diminution de la variabilité inter mensuelle. Les courbes de la moyenne mobile 30 ans et de l'écart-type mobile inter annuel 30 ans évoluent dans des sens opposés jusqu'au milieu du siècle, et suivent ensuite pratiquement la même trajectoire. Le coefficient de corrélation entre les deux courbes est de -0,40. À la figure 5.3, l'opposition entre les deux courbes est presque parfaite. Lorsque les températures augmentent, la variabilité inter mensuelle diminue avec un coefficient de corrélation de -0,95. Le lien unissant la température et la variabilité est moins flagrante d'une année à l'autre que d'un mois à l'autre. La deuxième hypothèse voulant qu'il existe une

corrélation positive entre la température et la variabilité est aussi rejetée, puisque la corrélation est négative, tel que nous venons de le démontrer.

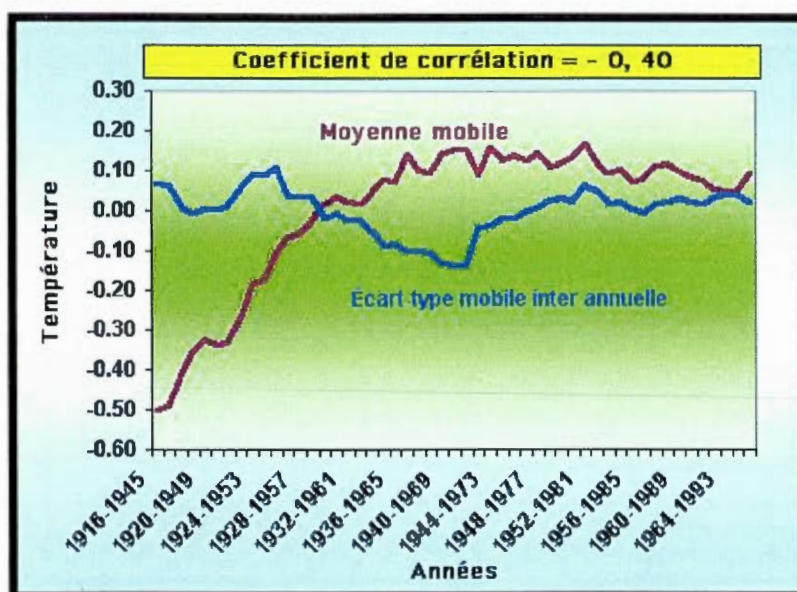


Figure 5.2 Moyenne mobile et écart-type mobile inter annuel normalisés à zéro des 22 stations de la province de Québec, de 1916 à 1995

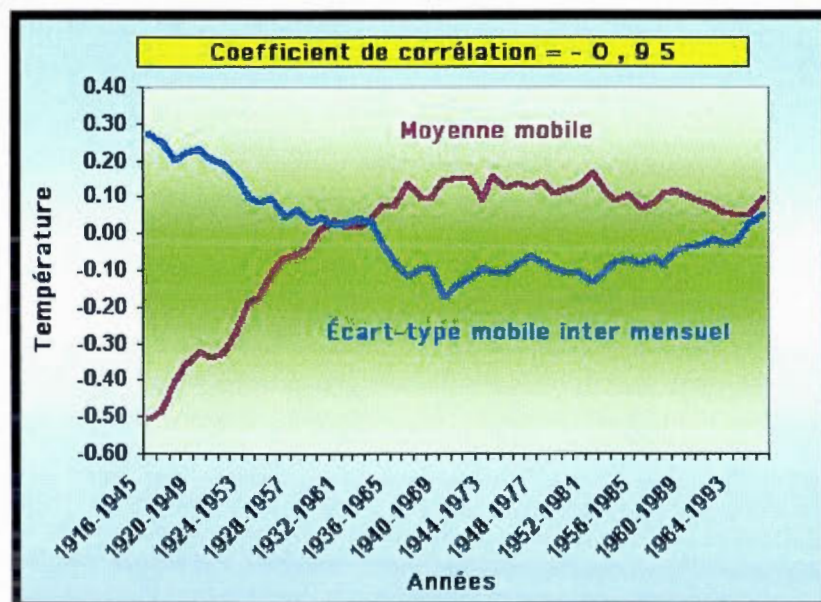


Figure 5.3 Moyenne mobile et écart-type mobile inter mensuel normalisés à zéro de la province de Québec, de 1916 à 1995

Dans une perspective plus territoriale, les courbes des températures moyennes annuelles des zones Sud, Est et Centre de la figure 5.4 se suivent et se ressemblent. La corrélation la plus forte (0,89) entre chacune des séries temporelles des températures moyennes annuelles de chacune des zones correspond à celles du Sud (depuis 1910) et du Centre (qui débute en 1910). Le lien est aussi très fort (0,86) entre les températures moyennes annuelles du Sud et de l'Est de la province. Ensuite, par ordre décroissant d'importance, les coefficients de corrélations sont de l'ordre de : 0,78 entre le Centre et l'Est; de 0,75 entre le Nord et l'Est et entre le Nord et le Centre; et finalement de 0,65 entre le Nord et le Sud. Le Sud suit une tendance au réchauffement plus prononcé que les trois autres zones. Les températures du début du siècle étant plus basses, il est fort probable que les valeurs manquantes du début du siècle (1895 à 1909 pour le Centre et 1915 pour le Nord) des zones Centre et Nord auraient pu contribuer à accentuer la tendance que nous obtenons.

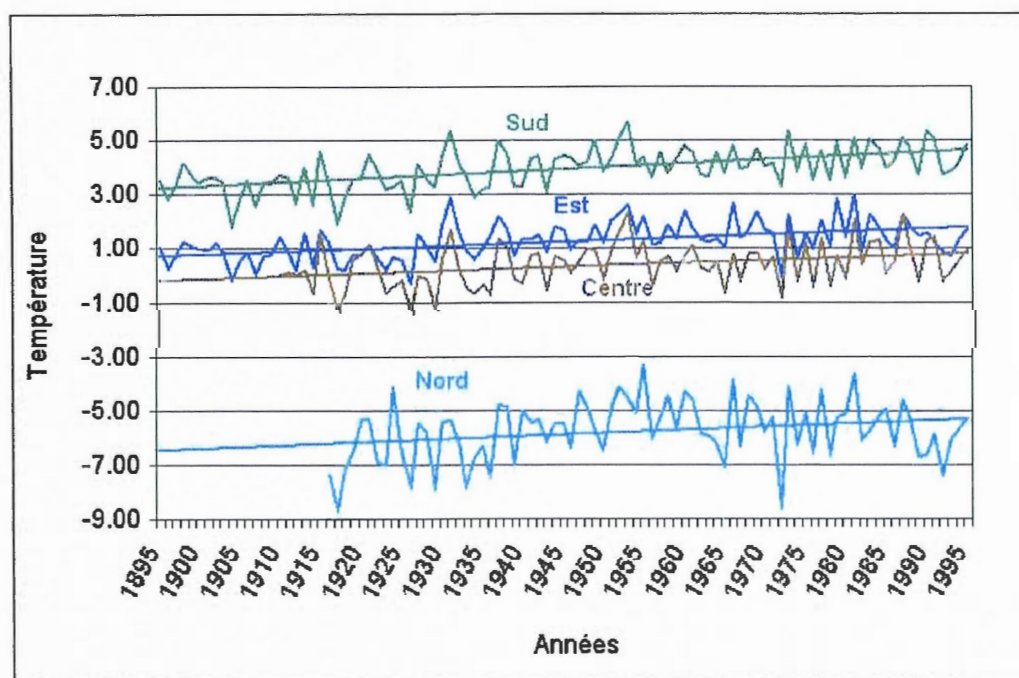


Figure 5.4 Températures moyennes annuelles reconstituées à chaque zone géographique

Les calculs statistiques constituant le tableau 5.3 permettent de constater que toutes les zones ont subi un réchauffement généralisé se situant entre 0,59 °C (Est) et 0,89 °C (Sud) depuis le début du siècle. Cependant, les températures à chacune des zones n'ont pas toutes connu la

même trajectoire ascendante. Alors que le réchauffement des températures dans le Centre et le Sud a été progressif au courant des trois périodes, celui du Nord et de l'Est s'est traduit d'abord par une hausse au courant des deux premières périodes et ensuite par une légère baisse (de 0,43 °C dans le Nord et de 0,13 °C dans l'Est) entre la deuxième et la troisième période. La tendance provinciale suit aussi le même patron. L'augmentation de la température entre la première et la deuxième période a aussi été beaucoup plus marquée dans le Nord (1,08 °C), surpassant le Sud, qui se classe au second rang, de 1 °C.

L'écart entre le minimum et le maximum record est de 1,77 °C supérieur dans le Nord à la moyenne des écarts des trois autres zones. Les températures les plus froides enregistrées dans le Sud et l'Est correspondent aux années 1904, 1907 et 1926. Il en aurait probablement été de même pour le Nord et le Centre si les températures du début du siècle avaient été disponibles. Plus tard, au niveau de toutes les régions, les années 1917, 1926 et 1929 ont aussi été parmi les plus froides. Les températures les plus élevées ont été quant à elles enregistrées en 1953, 1955, 1981 et 1987.

À partir des coefficients de corrélation "r" provincial et zonal, le calcul de la valeur du "t" (montré au tableau 5.2) nous a permis de déterminer le niveau de signification à l'aide de la table de Student (distribution unilatérale) et d'accepter ou de rejeter l'hypothèse nulle. Cette hypothèse se définit comme suit :

H0 : Il n'y a pas de relation entre la température (moyenne mobile) et la variabilité (écart-type mobile)

H1 : Il existe une relation entre la température (moyenne mobile) et la variabilité (écart-type mobile)

Les coefficients de corrélations entre la moyenne mobile 30 ans et l'écart-type mobile 30 ans inter annuel provincial et de la zone Est sont trop petit pour nous permettre de rejeter l'hypothèse nulle.

$$t_{\text{calculé}} = \frac{r \sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

(Spiegel et Schaum, 1972)

Les résultats démontrent des corrélations inverses très élevées, oscillant autour de -0,9, à l'échelle provinciale et zonale inter mensuel 30 ans, excepté dans l'Est de la province, où la corrélation entre la moyenne mobile et l'écart-type mobile est de 0,75. Au niveau inter annuel 30 ans, seul le Sud du Québec présente une corrélation inverse élevée de -0,71. Cela ne nous empêche cependant pas de rejeter l'hypothèse nulle dans le Centre et le Nord du Québec avec des coefficients de corrélations respectifs de seulement -0,49 et -0,22. Les coefficients de détermination inter annuel provincial et de l'Est de la province étant presque nuls indiquent qu'il n'y a pas de relation entre la température et la variabilité.

Tableau 5.1 Coefficient de corrélation de Pearson et seuil d'acceptation entre la moyenne mobile et l'écart-type mobile inter annuel et inter mensuel, à chacune des zones géographiques

Zones	Coef. corrél entre la moy mob et l'é-t mob (30 ans) inter annuel	tcalculé (°liberté)	Niveau de signification à n = 60	Coef. corrél entre la moy mob et l'é-t mob (30 ans) inter mensuel	tcalculé (°liberté)	Niveau de signification à n = 60
Nord 80 ans	-0.22	1,98 (78)	95%	-0.93	21,95 (78)	99,5%
Centre 86 ans	-0.49	5,16 (84)	99,5%	-0.91	19,66 (84)	99,5%
Sud 101 ans	-0.71	10,02 (99)	99,5%	-0.95	30,23 (99)	99,5%
Est 101 ans	-0.02	0,19 (99)	—	-0.75	11,27 (99)	99,5%
Province 80 ans	-0,08	0,70 (78)	—	-0,95	26,86 (78)	99,5%

Les abréviations Coef. corrél signifie coefficient de corrélation; moy mob a été utilisée pour caractériser la moyenne mobile, et é-t mob, pour décrire l'écart-type mobile. Ensuite, " ° liberté" symbolise les degrés de liberté et "n" équivaut au nombre inférieure au degré de liberté identifié dans chacune des zones dans la table de Student.

Le tableau 5.2 résume l'ensemble des résultats obtenus aux quatre zones géographiques et de la province à chacune des trois périodes à l'étude. La variabilité inter annuelle et inter mensuelle au courant des trois périodes de la section Nord surpasse nettement celle des autres régions. Ensuite se positionne dans l'ordre, le Centre, le Sud et l'Est au niveau inter annuel sauf au niveau inter mensuel où le Sud remplace le Nord. La distinction est claire entre les régions, démontrant qu'il existe bel et bien une relation entre la température, qui elle-même est fonction de la latitude, et l'intensité de la variabilité calculée. Les régions Centre et Est ont connu une hausse de la variabilité entre le début du siècle et la période actuelle autant au niveau inter annuel qu'inter mensuel. Le Sud a subi la hausse la plus importante au niveau inter mensuel, tandis que le Nord a connu une baisse de la variabilité inter annuelle et inter mensuelle. Le bilan de la variabilité entre la première période et la dernière période pour l'ensemble de la province indique une baisse de l'écart-type inter annuel et inter mensuel de seulement 0,02, et de 0,07.

En comparant les trois périodes des quatre régions géographiques, nous constatons que la variabilité inter annuelle et inter mensuelle dans le Nord de la province a diminué (de 0,28 au niveau inter annuel et de 0,05 au niveau inter mensuel davantage entre la première et la deuxième période que dans les autres régions).

Les trois premiers minimums records dans chacune des zones géographiques ont été enregistrés vers le milieu des années 50 jusqu'en 1981 pour les sections Centre et Nord, et entre 1966-1969 au niveau des régions Sud et Est de la province. Dans les zones Nord, Sud, et Est, les trois premiers maximums records ont été enregistrés entre 1933 et 1935, tandis qu'ils apparaissent dans l'ordre en 1989, 1916, et 1917 dans le Centre de la province.

Tableau 5.2 Analyse de la variabilité inter annuelle et inter mensuelle à chacune des zones géographiques au cours des trois périodes à l'étude.

Zones géographiques Année d'implantation	Moy (1895...1995)		Début du Siècle (1895...1940)		Milieu du siècle (1941-1970)		Période actuelle (1971-1995)		Écart entre le début du siècle & la période actuelle		Min record/ Année	Max record/ Année	Écart entre le Max record et le Min record							
	T	E-t ia E-t im	T	E-t ia E-t im	T	E-t ia E-t im	T	E-t ia E-t im	T	E-t ia E-t im	T	T	T							
Nord 1916	-5,78	1,06	2,21	-6,39	1,17	2,29	-5,31	0,89	2,24	-5,74	1,09	2,06	↑0,65	↓0,08	↓0,23	-8,74	-3,34	1917	1955	5,40
	0,36	0,87	2,03	-0,03	0,80	1,93	0,53	0,63	2,04	0,63	0,85	2,09	↑0,69	↑0,05	↑0,16	-1,43	2,27	1926	1987	3,7
Sud 1895	3,92	0,76	2,09	3,46	0,71	1,64	4,26	0,51	2,02	4,35	0,64	2,72	↑0,89	↓0,07	↑1,08	1,78	5,66	1904	1953	3,88
	1,25	0,68	1,72	0,88	0,62	1,37	1,60	0,49	1,78	1,47	0,70	2,09	↑0,59	↑0,08	↑0,72	-0,34	2,99	1926	1981	3,33
Province 1916-1995	0,21	0,69	1,62	-0,28	0,78	1,63	0,47	0,56	1,64	0,38	0,74	1,56	0,66	↓0,02	↓0,07	-1,79	1,81	1917	1981	3,6

Dans l'entête, l'expression "Moy (1895...-1995)" correspond à la moyenne de la période de chacune des zones, qui varie de 80 ans (Nord et Province) à 101 ans (Sud et Est). La moyenne provinciale n'est donc pas une moyenne des quatre valeurs énumérées à chacune des zones de ce tableau mais une valeur moyenne de chacune des zones des années 1916 à 1995. Les abréviations "T", "E-t ia" et "E-t im", signifient dans l'ordre: la température, l'écart-type inter annuel et l'écart-type inter mensuel. Les températures minimales et maximales record "Min record" et "Max record" sont identifiées juste en dessous par la date à laquelle le minimum et le maximum sont survenus.

5.6 Détermination de l'objectif principal et des hypothèses de la recherche à travers les saisons

La figure 5.5 illustre les tendances au réchauffement et au refroidissement des températures moyennes annuelles provinciales à chacune des saisons. Toutes les saisons ont connu une hausse généralisée des températures moyennes annuelles par rapport au début du siècle. L'automne a subi une élévation moins importante que les autres saisons et l'hiver une augmentation plus prononcée, mais qui s'estompe assez rapidement à partir du milieu du siècle. Les courbes des températures hivernales et estivales suivent la même tendance. Un réchauffement progressif caractérise la première moitié du siècle, et un refroidissement (plus prononcé en été) s'amorce ensuite jusqu'en 1995. Les courbes de tendances printanières et automnales se ressemblent également. La pente de l'évolution des températures automnales et printanières suivent une pente ascendante plus douce et continue qu'en hiver et en été. Au moment où la courbe des températures hivernales et estivales atteignent leur apogée, les températures automnales connaissent une légère baisse et celles du printemps, une stagnation.

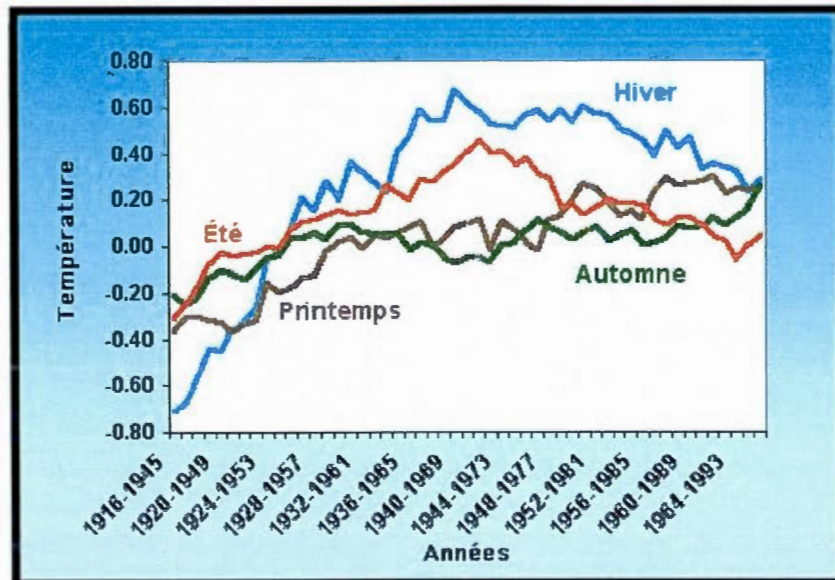


Figure 5.5 Moyenne mobile des températures moyennes annuelles saisonnières normalisées à zéro des 22 stations de la province de Québec, de 1916 à 1995

Les courbes de l'écart-type mobile (figure 5.6) des températures moyennes annuelles saisonnières suivent des tendances très variées d'une saison à l'autre. Les variations de l'écart-type sont beaucoup plus importantes en hiver qu'à n'importe quelle autre saison, et surtout au début et au milieu du siècle. La courbe des températures automnales présente aussi quelques oscillations jusqu'au milieu du siècle, puis une stabilisation. Les courbes des températures hivernales et estivales montrent une baisse de la variabilité dans la dernière période. Les températures printanières se caractérisent pratiquement par une droite légèrement inclinée vers le bas. Au fur et à mesure que les températures ont augmenté au cours du XX^e siècle, la variabilité inter annuelle hivernale et printanière a diminué, tandis que la variabilité estivale et automnale ont légèrement augmenté.

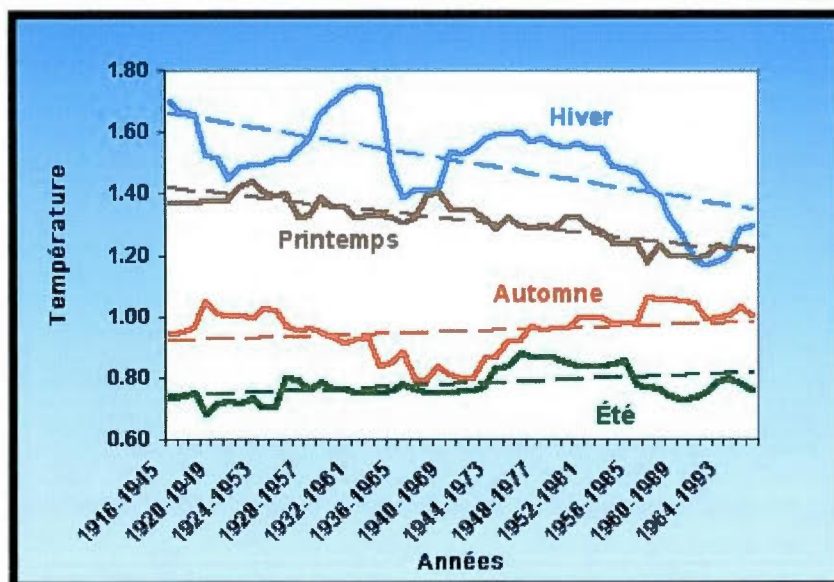


Figure 5.6 Écart-type mobile des températures moyennes annuelles saisonnières normalisées à zéro des 22 stations de la province de Québec, de 1916 à 1995

L'hiver est la saison qui présente la plus grande variabilité quelque soit la région étudiée. L'été est par contre à l'opposé et est la plus stable. Quant au printemps et à l'automne, ils évoluent souvent de la même manière.

Les plus fortes corrélations entre la température et la variabilité (l'écart-type) ont été observées au niveau provincial dans l'ordre : au printemps (-0,79), en automne (-0,62) et en été (0,42). Au printemps et en automne, le signe négatif indique que lorsque la température augmente, la variabilité diminue, alors qu'en été lorsque la température augmente, la variabilité augmente. Ensuite, en observant individuellement les résultats des coefficients de corrélation à chacune des zones, c'est la zone Sud, en été qui enregistre le coefficient le plus élevé (0,65), suivi du Centre en automne (-0,60), et en hiver (-0,50), et à nouveau dans la zone Sud en hiver (-0,51) et au printemps (-0,47). Seules la saison hivernale dans le Nord et les saisons printanière et automnale dans l'Est, ne présentent pas un coefficient de corrélation suffisamment élevé pour être considérés significatifs.

Tableau 5.3 Corrélation entre la moyenne mobile et l'écart-type mobile inter annuel saisonnier à chacune des zones géographiques

	Nord	Centre	Sud	Est	Province
Hiver	0,05 (0,44)	-0,58 (6,53)	-0,51 (6,00)	0,40 (4,34)	-0,19 (1,71)
Printemps	0,35 (3,30)	-0,23 (2,17)	-0,47 (5,30)	-0,04 (0,40)	-0,79 (11,38)
Ete	0,29 (2,68)	0,18 (1,70)	0,65 (8,51)	0,35 (3,72)	0,42 (4,09)
Automne	0,25 (2,28)	-0,60 (6,87)	-0,23 (2,35)	-0,06 (0,60)	-0,62 (6,98)

Les valeurs des coefficients de corrélation soulignées en rouge vin indiquent un niveau de signification supérieur à 99,5% (0,5% des chances que ce soit dû aux effets aléatoires), celles soulignées en rouge, un niveau de signification supérieur à 97,5% (2,5% des chances que ce soit dû aux effets aléatoires), et celles soulignées en jaune, un niveau de signification supérieur à 95% (5% des chances que ce soit dû aux effets aléatoires). La valeur du t calculé est indiquée entre parenthèse.

Le tableau 5.4 de la page suivante montre que les températures au printemps et en été augmentent de façon continue (excepté dans le Nord au printemps) au courant de trois périodes pour toutes les zones. De façon générale, dans toute les zones et pour toutes les saisons, les températures augmentent entre la première et la deuxième période, et elles diminuent entre la deuxième et la troisième période, mais restent à un niveau supérieur aux températures moyennes de la première période. Par ordre décroissant d'importance les écarts-types saisonnier pour l'ensemble des régions se classent comme suit : hiver, printemps, automne et été. Les écarts-types des zones Nord et Centre en Automne surpassent cependant, les écarts-types printaniers du Sud et de l'Est, et l'écart-type printanier du Nord surpasse l'écart-type hivernal du Sud et de l'Est, et l'écart-type printanier du Centre, surpasse l'écart-type hivernale de l'Est. Les écarts-types des températures moyennes annuelles saisonnières du Nord sont plus élevés que ceux des autres régions, et à l'opposé, l'Est présente les plus faibles écarts-types saisonniers. Les différences entre les écarts-types à chacune des régions sont infimes en été. En automne, les écarts-types du Nord et du Centre et ceux du Sud et de l'Est sont pratiquement identiques avec un décalage entre les zones "Nord-Centre" et "Sud-Est".

En réponse à la première hypothèse, la variabilité des températures de la dernière période est supérieure à celle de la première période seulement à l'automne dans le Nord, le Centre, l'Est et la Province, et à l'été, dans le Sud. La troisième hypothèse voulant que la période comprise entre 1941 et 1970 ait été la moins variable du siècle est rejetée dans le Centre et le Sud au printemps et en été, dans l'Est à l'hiver et au printemps, et de la Province au printemps. Les températures étaient de façon générale plus variables au printemps à la deuxième période dans toute les zones et à l'échelle provinciale, alors que les températures de cette période correspondent à la moyenne la plus élevée.

Tableau 5.4 Températures et écarts-types moyens annuels saisonniers périodiques à chacune des zones géographiques

	Hiver		Printemps		Été		Automne	
	T	É-t inter	T	É-t inter	T	É-t inter	T	É-t inter
Nord								
1916-1940	-23,79	2,57	-9,12	1,86	8,39	1,15	-1,1	1,21
1941-1970	-21,09	2,23	-8,68	1,72	9,03	0,92	-0,44	1,14
1971-1995	-22,49	1,76	-9,13	1,66	9,36	0,99	-0,76	1,39
1916-1995	-22,40	2,44	-8,96	1,75	8,93	1,08	-0,75	1,26
Centre								
1910-1940	-16,70	1,92	-1,31	1,28	14,98	0,98	2,86	1,17
1941-1970	-15,89	1,71	-0,61	1,74	15,02	1,02	3,64	0,96
1971-1995	-15,99	1,52	0,19	1,36	15,36	1,00	2,92	1,29
1910-1995	-16,21	1,76	-0,63	1,58	15,10	1,00	3,15	1,18
Sud								
1895-1940	-11,22	1,80	2,94	1,18	17,52	0,79	6,19	0,92
1941-1970	-10,24	1,48	3,64	1,23	17,95	0,82	7,22	0,80
1971-1995	-10,14	1,34	4,13	1,12	18,25	0,81	6,72	0,89
1895-1995	-10,66	1,68	3,46	1,27	17,84	0,85	6,64	0,98
Est								
1895-1940	-11,51	1,49	-0,09	1,09	12,98	0,86	3,77	0,78
1941-1970	-10,21	1,64	0,30	1,17	13,37	0,75	4,57	0,7
1971-1995	-10,98	1,11	0,57	1,05	13,73	0,7	4,13	0,8
1895-1995	-10,99	1,54	0,19	1,13	13,28	0,84	4,10	0,83
22 stations								
1916-1940	-15,84	1,82	-1,91	1,29	13,65	0,78	2,95	1,00
1941-1970	-14,38	1,53	-1,33	1,35	13,84	0,76	3,76	0,80
1971-1995	-14,90	1,09	-1,06	1,16	14,17	0,77	3,25	1,01
1916-1995	-15,00	1,61	-1,43	1,30	13,89	0,79	3,35	0,98

DISCUSSION

L'observation la plus marquante a été l'existence d'une corrélation inverse entre la température et la variabilité, ce qui vient en opposition à l'objectif principal ainsi qu'à la première et à la deuxième hypothèse de la recherche. Au fur et à mesure que les températures ont augmenté au courant des deux premières périodes, la variabilité a décru. Toutefois, l'alarme sonnée par plusieurs scientifiques concernant une hausse de la variabilité du climat depuis quelques années, a effectivement été observée avec le paramètre des températures moyennes annuelles provinciales au courant de la troisième période à l'étude. Depuis l'année 1972, non seulement les oscillations de la température d'une année à l'autre ont pratiquement retrouvé le même niveau d'amplitude qu'au début du siècle, mais la fréquence des fluctuations est plus élevée. Les changements de la température passant d'un optimum à un autre se produisent de nos jours à tous les ans, alors que la moyenne était de 2,2 ans au début du siècle. Ces amplitudes restent cependant moins importantes d'un mois à l'autre que d'une année à l'autre.

Dépendamment de l'échelle de temps avec laquelle nous effectuons nos analyses, les informations diffèrent, et ce, même si les données utilisées constituent le même échantillon de population. Nous avons noté l'existence d'un lien très fort (-0,95) entre les températures et la variabilité d'un mois à l'autre, alors que ce lien est faible (-0,4) d'une année à l'autre. La question que l'on se pose est si " Les données journalières (homogénéisées) ne nous permettraient-elles pas de déceler un lien encore plus serré entre la température et la variabilité? ". Ces données pourraient nous permettre d'évaluer l'évolution du niveau de variabilité quotidienne à travers l'histoire, et de découvrir certains indicateurs importants d'extrêmes de la température tels que le nombre de jours consécutifs de chaleur accablante ou de froid intense, dont la température moyenne mensuelle ne donne aucune indication.

En comparant les résultats des températures moyennes mensuelles centennales, saisonnières, et zonales, les écarts-types les plus élevés ont été associés aux températures les plus froides. La variabilité est alors d'autant plus grande lorsqu'on se dirige vers le nord, que l'on approche de la saison hivernale, et plus particulièrement du mois le plus froid, c'est-à-dire janvier. Une autre observation inattendue: l'analyse des courbes de tendances des températures moyennes

annuelles saisonnières révèlent que le réchauffement a engendré une légère hausse de la variabilité au courant des saisons les plus chaudes, à l'été et à l'automne, et une baisse plus importante au courant des saisons froides, soit à l'hiver et au printemps. Wallace et al. (1996) avaient aussi fait la même observation à l'échelle mondiale en précisant que cette hausse de la variabilité a été davantage perçue depuis les années 70.

Bien que les régions côtières de la Côte-Nord et de la péninsule gaspésienne présentent un niveau de variabilité inférieur à ceux des autres régions du Québec, elles ont connu une hausse fulgurante de la variabilité inter annuelle de 43% depuis le milieu du siècle. Cette hausse est supérieure de 14% à la moyenne des trois autres zones. Le Centre a aussi subi une augmentation importante de sa variabilité inter annuelle équivalente à 35% de la deuxième à la troisième période, ce qui le classe au second rang, alors que le Sud et le Nord se positionnent au troisième et quatrième rang. Une élévation de 6% a aussi été enregistrée au niveau inter mensuel dans le Centre au courant de cette même période. Malgré ce faible pourcentage, la variabilité inter mensuel du Centre de la province surpasse celle des autres zones de plus de la moitié. Étonnement, la section Nord a connu la plus faible augmentation (23%) de sa variabilité inter annuelle de la deuxième à la troisième période. Or, même si le poids de l'influence de la variabilité inter annuelle du Nord du Québec est le plus élevé (35%), la hausse de la variabilité a été la plus faible.

Après observation des différences de la variabilité des températures du sud vers le nord du Québec, nous en sommes rendus à nous poser la question suivante: « si le réchauffement planétaire génère un déplacement des écotomes du sud vers le nord dans les années à venir, est-ce que la variabilité des températures des différents milieux écoclimatiques au Québec seront les mêmes que celles des régions situées originellement plus au sud, ou subiront-elles aussi les influences de la variabilité associées au déplacement latitudinale ? » Par exemple, si dans 50 ans un réchauffement additionnel de 0,5°C amène à Montréal l'équivalent de la variabilité des températures de New York, est-ce que la variabilité originale de la région de New York sera conservée ou amplifiée? Autrement dit, indépendamment du déplacement des isothermes du sud vers le nord, la latitude ne jouerait-elle pas un rôle sur la variabilité des températures?

Bien que la technique mathématique d'homogénéisation soit considérée fiable, il demeure un certain doute du fait de l'absence de données réelles. Il en est de même au niveau de la reconstitution des séries temporelles (plus particulièrement celles du Nord parce qu'elles débutent tardivement) d'une station voisine par une station de base dont le coefficient de corrélation a un degré de signification élevé. Même si la probabilité de refléter la réalité est forte, il subsiste une certaine ambiguïté due à l'absence de données enregistrées sur le terrain à cette époque. Dans le Centre de la province par exemple, la reconstitution de la station Val D'Or qui débute en 1946, représente une série temporelle de 52 ans, ce qui est non négligeable.

Malgré le pas important que cette recherche nous a permis de franchir sur la variabilité des températures au Québec, les analyses futures devront pallier certaines lacunes. Entre autres, le nombre, la localisation, et les dates d'édification des stations n'étant pas uniforme à travers toute la province, cela pourrait avoir pour effet de réduire l'exactitude des résultats, surtout dans les zones Centre et Nord. Les stations de ces deux dernières régions sont localisées au pourtour du territoire ce qui élimine d'emblée les informations nécessaires à la compréhension du climat continentale. Sur ces aspects, le Sud présente plus de constance et d'homogénéité, attribuable au nombre élevés de stations débutant pratiquement toutes vers 1895, et couvrant l'ensemble du territoire.

L'homogénéisation des données journalières d'un plus grand nombre de stations offrant une représentativité statistiquement significative des territoires des zones Centre et Nord devrait éventuellement être fournie. Du même coup, des reconstitutions des séries temporelles des stations les plus tardives au niveau des stations les plus anciennes et situées à une distance appropriée devraient être réalisées en incluant les années 1996 à 2000. Si nous avions pu inclure ces cinq dernières années à notre étude et que la tendance à la hausse de la variabilité se serait poursuivie jusqu'à aujourd'hui telle que le démontre la tendance depuis les années 70, nous aurions pu découvrir que la période actuelle aurait été la plus variable du siècle, et ainsi, accepter la première hypothèse.

À travers notre cheminement méthodologique, plusieurs idées intéressantes qui nous sont venues à l'esprit n'ont pu être développées par manque de temps. Par exemple, la modélisation

statistique des séries chronologiques de la température permet de déterminer avec exactitude à quelle année la courbe de tendance des températures s'oriente dans une direction opposée. Ces mêmes analyses peuvent aussi nous aider à évaluer le niveau de croissance des pentes au réchauffement et au refroidissement, et à l'augmentation et à la diminution de la variabilité, ainsi que la durée exacte de chacune de ces phases. Des analyses de ce genre pourraient nous permettre d'envisager des prédictions futures des tendances de la variabilité de la température sur de courtes périodes de temps. Pour ce qui est des prévisions à plus long terme, l'intervention des autres domaines étudiant les paléoclimats est indispensable. L'objectif ultime à travers l'étude des tendances de la variabilité des températures vise une amélioration de la compréhension de la variabilité du climat québécois. Cet objectif ne peut être atteint sans la mise en commun de d'autres recherches déjà effectuées portant sur d'autres paramètres climatiques québécois (couvert nivale, vitesse du vent, pression, humidité, ensoleillement, etc) et d'une analyse tout aussi détaillée de la variabilité des précipitations, dont les données sont aussi disponibles depuis 1895.

CONCLUSION

Au Québec, les températures moyennes au 22 stations ont augmenté de 0,7 °C depuis 1916. Ce réchauffement n'a pas été constant tout au long de l'histoire. Les températures moyennes provinciales ont d'abord augmentées de 1916 à 1940, se sont ensuite stabilisées de 1941 à 1970, et ont à nouveau augmenté de 1971 à 1995. L'augmentation la plus importante s'est effectuée de 1916 à 1970 (un réchauffement de 0,75 °C entre les températures moyennes de la première période et de la deuxième période). La période la plus chaude du siècle correspond aux températures moyennes enregistrées lors de la deuxième période, c'est-à-dire entre 1941 et 1970. La courbe des tendances au réchauffement et au refroidissement des températures au Québec au XX^e siècle coïncide avec l'évolution des températures mondiales tel que décrit au chapitre I.

Nous avons observé qu'au fur et à mesure que la température augmentait entre 1916 et 1970, la variabilité autant inter annuelle qu'inter mensuelle diminuait (une diminution de 28% au niveau inter annuelle et de 4% au niveau inter mensuelle). Les années 1940 à 1970 correspondent donc à la période la moins variable du siècle, d'où l'acceptation de la troisième hypothèse. Étonnamment, la dernière période s'est caractérisée par un revirement de la situation. Alors qu'auparavant la variabilité diminuait lorsque la température augmentait, le réchauffement engendre depuis 1970 une élévation de la variabilité de 32% presque équivalente à celle du début du siècle. Cet état de fait nous oblige à n'accepter qu'en partie l'objectif principal et à rejeter la première hypothèse et la deuxième hypothèse de la recherche qui sont intimement liés. Le réchauffement qu'a connu le Québec au courant du XX^e siècle a été associée à une augmentation de la variabilité seulement depuis 1970, et malgré cette nouvelle hausse de la variabilité, la période actuelle reste tout de même moins variable que celle du début du siècle, lorsque les températures étaient plus froides. Également, les corrélations entre la moyenne des températures et l'écart-type des températures annuelles et mensuelles (variabilité inter annuelle et inter mensuelle) couvrant toute la période 1895 à 1995 se sont avérées être négatives et non positives telle que le supposait la deuxième hypothèse (corrélation de -0,40 au niveau inter annuel et de -0,95 au niveau inter mensuel).

Des associations entre la température et d'autres paramètres climatiques devront être établies afin d'avoir une compréhension globale de la variabilité climatique. Étant donné l'importance de ce sujet au niveau sociétale pour les générations présentes et futures, il faut avoir un suivi rigoureux sur tous changements éventuels de la température. Au Québec, un approfondissement des analyses des courtes tendances de la variabilité des températures journalières (homogénéisées), et éventuellement des précipitations au XX^e siècle, est indispensable. Telle que le mentionnait Louise Marchand dans son mémoire, tout reste à faire au niveau de la recherche dans les articles de journaux d'époque, journaux de bord ou des Archives Nationales pour tenter de reconstituer des séries temporelles sur une période beaucoup plus longue que celle que nous possédons actuellement. Plusieurs de ces références peuvent nous permettre de reconstituer des séries temporelles remontant jusqu'au XVI^e siècle. Parallèlement à cela, l'effort de mettre en commun les connaissances, les nouvelles techniques de datation et les découvertes récentes des domaines d'études (biologie, histoire, géographie, géologie, etc.) s'intéressant à la paléoclimatologie, doit être fourni afin d'accroître la compréhension et l'efficacité des prévisions climatiques à court et à long terme. La fiabilité des prévisions futures repose aussi cependant sur la volonté de coalition des connaissances des domaines étudiant les tendances des fluctuations intermédiaires (quelques centaines d'années) et des grandes fluctuations (quelques milliers et millions d'années) paléoclimatiques.

L'incertitude face aux tendances de la variabilité des températures origine d'un phénomène beaucoup plus fondamental: le développement. Au départ le développement industriel se voulait être une libération des souffrances dû au froid, à la faim, et aux maladies. Aujourd'hui, l'accroissement fulgurante des populations humaines et de la pollution, mettent en péril notre bien-être (santé, sécurité) et notre espérance de vie. L'obsolescence des biens constitutif d'un bien-être et d'une richesse davantage psychologique que physique chez les populations des pays industrialisés, jumelée à l'absence de gestion des ressources naturelles, sont les premières causes de dépérissement des milieux naturels. Pourtant, les populations les plus sensibilisées à l'environnement sont celles des pays industrialisés. L'éducation doit maintenant dépasser le seuil de la simple représentativité d'un environnement sain, elle doit permettre le passage de l'image à l'action. Les investissements doivent permettre

l'implantation d'infrastructures adaptées pour faire face aux changements qui s'imposent. Nous devons changer notre façon de penser et d'agir sur l'environnement non pas parce que nous connaissons les tendances futures des températures, mais justement parce que nous ignorons ce qui pourrait arriver. Devant une telle incertitude, nous devons user du principe de précaution et réduire de façon considérable les gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Vue l'influence de la température sur les prévisions du temps et du climat, ce paramètre devrait être utilisé comme facteur déterminant dans la gestion des ressources, du développement économique et social des régions. Jusqu'à présent, les sociétés les plus à l'avant-garde sont celles qui comprennent le mieux combien les efforts fournis en météorologie ont été insuffisants. Une application appropriée de connaissances plus poussées sur la variabilité des températures, constitue un investissement à la fois au point de vue des biens et de la santé des individus, que de ceux de la nation.

RÉFÉRENCES

- Alalouf, S., D. Labelle et J. Ménard. 1990. *Introduction à la statistique appliquée*, 2^e éd. Montréal : Addison-Wesley, 412 p.
- Allan, R.J. et al. 2000. "ENSO and climatic signals across the Indian Ocean basin: Part II, Decadal to multidecadal composite patterns". *Journal of Climate*. à paraître plus tard.
- Baillargeon, G. 1984. *Les techniques statistiques*. Québec : SMG, 542 p.
- Blanchet, J.-P. Communications. 2000
- Bourque, A.. Communications personnelles. 2000.
- Brien, G. Communications personnelles. 2000
- Bryant, C. et al. 1997. *L'adaptation agricole aux changements climatiques: le cas du Québec*. "Le climat". vol.14. no. 2, p. 81-97.
- Bureau d'assurance du Canada. 2000
- Canada, ministère de l'environnement. Service de l'Environnement Atmosphérique (Québec). 1987. *Prospectives d'un changement climatique dû à un doublement de CO₂ atmosphérique pour les ressources naturelles du Québec*. par Singh, B. Montréal : Université de Montréal, 291p.
- Canada, ministère des approvisionnements et services Canada. 1990. *Les climats du Canada*. En56-1/1990F. Ottawa : Environnement Canada, 176 p.
- Canada, ministère de l'Environnement et ministère des Approvisionnement et Services Canada. 1992. *L'état du climat au Canada: les variations de la température au Canada 1895-1991*. Rapport sur l'état de l'environnement, par D.W. Gullett et W.R. Skinner. EDE92-2. Downsview : Environnement Canada, 36 p.
- Canada, ministère de l'Environnement et ministère des Travaux publics et des Services gouvernementaux Canada. 1995.. *L'état du climat au Canada : la surveillance de la variabilité et du changement climatiques*. Rapport sur l'état de l'environnement EDE95-1. Downsview : Environnement Canada, 52 p.
- Canada, ministère de l'environnement. 1997. *Impacts et adaptation à la variabilité et au changement du climat au Québec*. Tome V de l'étude pan-canadienne : Impacts et adaptation au climat. En56-119/3-1997F. Ottawa : Environnement Canada, 270 p.

- Canada, ministère des approvisionnements et services Canada. 1998. *Sommaire du changement climatique: Phénomènes météorologiques extrêmes et changement climatique* En57-27-1998. Downsview : Environnement Canada, 31 p.
- De Vernal, A. 1997. "La dimension historique des variations climatiques: lecture du passé." *Le climat*. vol. 14. no. 2, p.59-63
- Easterling, D.R. et al. 1997. "Maximum and minimum temperature trends for the globe." *Science*, vol. 277. no. 5324 p. 364-367
- Gagnon, R. 1997. "Les impacts des changements climatiques sur la forêt boréale fermée du nord-est canadien." *Le climat*. vol. 14. no. 2, p. 99-102
- Gangloff, P. Communications personnelles. 1996
- Gallo, K.P. et al. 1999: "Temperature trends of the U.S. Historical Climatology Network based on satellite-designated land use/land cover." *Journal of Climate*, vol. 12. no.5, p. 1344-1348
- Germa, P. 1992. *Depuis Quand?: De A à Z, les origines de tout ce qui fait notre univers quotidien*. Paris : Solar, 427 p.
- Grove, J.-M. 1988. *The little ice age*. London : Methuen, 498 p.
- Hidore, J.J. 1996. *Global Environmental Change : Its nature and impact*. Upper Saddle River, N.J. : Prentice-Hall, Inc, 263 p.
- Houdas, Y. et J.-D. Guieu. 1977. *La fonction thermique*. Villeurbanne : SIMEP, 232 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 1999. *IPCC Third Assessment Report (TAR) Expert Review*.
- Karl, T.R et al. 2000. "The record breaking global temperatures of 1997 and 1998: evidence for an increase in the rate of global warming" *Geophysical Research*. à paraître plus tard.
- Lamothe, M. Communications personnelles. 2000
- Lucotte, M. Communications personnelles. 1998
- Lemoine, R. 1981. "Étude des tendances, périodicités et caractéristiques du climat au Québec 1798-1975." Mémoire de maîtrise, Montréal, Université du Québec à Montréal, 73 p.
- Le Petit Larousse illustré éd.* 1999. Paris : Larousse, 1784 p.
- Le Roy Ladurie, E. 1967. *Histoire du climat depuis l'an mil*. Paris : Flammarion, 381 p.

- Mackenzie, F. T. et J. A. Mackenzie, 1995. *Our Changing Planet : An Introduction to Earth System Science and Global Environmental Change*. Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall, 387 p.
- Marchand, L. 1980. "Documents historiques sur le climat du Québec et comparaison des températures de Montréal et de Toronto (1840-1975)". Mémoire de maîtrise, Montréal, Université du Québec à Montréal, 97 pages.
- Michaels, P.J. et al. 1998. "Analysis of trends in the variability of daily and monthly historical temperature measurements." *Climate Research*. vol.10. no. 1, p. 27-33
- Parker, D.E. et C.K. Folland. 1992. "Peut-on mesurer la température terrestre?" *La Recherche*, vol. 23. no.243, p.584-590
- Péron, F. 1999. *Variabilité du climat au Québec: Les 100 dernières années 1895-1995*,. Rapport de recherche, Montréal, Université du Québec à Montréal. 14 p.
- Prichonnet, G. Communications personnelles. 1998
- Québec, Bureau de la statistique du Québec. 1995. *Le Québec statistique 60^e édition*. Québec : Les publications du Québec, 819 p.
- Québec, ministère des ressources naturelles : Direction des relations publiques. Direction de la gestion des stocks forestières. 1998. *Paysages régionaux du Québec méridional*. par Robitaille, A. et J.-P. Saucier. Québec : Penguin Books, 213 p.
- Recknagel Sprenger, H. 1980. *Manuel pratique du génie climatique*. Paris : PYC, 1495 p.
- Robert, P. *Le Petit Robert 1*. Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française. éd. 1997. Par A. Rey et J. Rey-Debove. Paris : Le Robert, 2172 p.
- Slivitzky, M. 1997. "Les ressources en eau, leurs usages et disponibilités et les variations climatiques." *Le climat*. vol.14. no. 2., p.103-107
- Smith, L. P. et M. A. Kohler. 1964. *Le temps et l'homme : Rôle de la météorologie dans le développement économique*. Genève : Organisation météorologique mondiale. OMM no. 143. TP. 67, 80 p.
- Spiegel, M. R. et D. Schaum. 1972. *Théorie et applications de la statistique*. New York: McGraw-Hill. Série Schaum, 358p.
- Swetnam, T.W. et J.L. Betancourt, 1998. "Mesoscale Disturbance and Ecological Response to Decadal Climatic Variability in the American Southwest." *Journal of Climate*. vol.11. no.12, p. 3128-3147.
- Terence et Campo. 1998. IPCC 2000. Third Assessment report. Expert Review

Terence et Webster. 1998. IPCC 2000. Third Assessment report. Expert Review.

UNESCO, Organisation météorologique mondiale, Union géodésique et géophysique internationale, Assemblée générale. Association internationale des sciences hydrologiques, Canada, Service de l'environnement atmosphérique. 1987. *The influence of climate change and climate variability on the hydrologic regime and water resources*. Solomon, S.I., M. Beran et W. Hogg (éditeur). IAHS no. 168. Wallingford, Angleterre : International Association of Hydrological Sciences, 168 p.

Vincent, L. A. 1998. "A technique for the identification of inhomogeneities in Canadian temperature series." *Journal of Climate*, vol.11, no.5, p. 1094-1104.

Vincent, L. A. et D. W. Gullett, 1999. "Canadian historical and homogeneous temperature datasets for climate change analyses." *International Journal of Climatology*, vol.19, no. 13, p. 1375-1388.

Wallace, J.M., Y. Zhang, et L. Bajuk. 1996. "Interpretation of Interdecadal Trends in Northern Hemisphere Surface Air Temperature." *Journal of Climate*. Vol. 9. no. 2, p.252-257.

Wang, B. Et Y. Wang, 1996. "Temporal structure of the Southern Oscillation as revealed by waveform and wavelet analysis." *Journal of Climate*, vol.9, no.7, p. 1586-1598

Whittow, G. G. 1970. *Comparative physiologie of thermorégulation*. New York : Academic Press.

APPENDICE A

EXEMPLE DE GRILLE DE CALCULS

Tableau A.1 Moyenne mobile et écart-type mobile (30 ans) printannier (février, mars, avril) de 1916 à 1947

Années	Tmoy ann. février	Tmoy ann. mars	Tmoy ann. avril	Moy.ann. printemps	Années	Moy. mob.	É-t. mob. Inter annuel
1916	-19.05	-13.95	0.03	-10.99	1916-1945	-9.30	1.71
1917	-19.41	-10.50	-2.59	-10.83	1917-1946	-9.23	1.68
1918	-20.09	-10.93	-0.91	-10.64	1918-1947	-9.15	1.66
1919	-13.12	-8.42	-2.14	-7.89			
1920	-15.44	-9.49	-0.89	-8.61			
1921	-16.04	-8.07	0.66	-7.81			
1922	-17.92	-8.95	-0.27	-9.05			
1923	-19.82	-15.37	-3.53	-12.90			
1924	-17.20	-6.17	-0.74	-8.04			
1925	-14.34	-7.97	-1.36	-7.89			
1926	-18.26	-13.21	-5.38	-12.28			
1927	-15.41	-7.36	-0.90	-7.89			
1928	-16.98	-10.33	-3.11	-10.14			
1929	-16.30	-10.58	-3.23	-10.04			
1930	-16.74	-9.39	-2.61	-9.58			
1931	-14.72	-5.99	0.15	-6.85			
1932	-17.69	-10.99	-1.84	-10.17			
1933	-15.54	-10.83	-0.76	-9.04			
1934	-21.64	-11.86	-0.49	-11.33			
1935	-17.63	-11.39	-1.39	-10.14			
1936	-17.99	-5.51	-2.29	-8.60			
1937	-11.80	-10.31	0.19	-7.31			
1938	-16.25	-9.48	-1.40	-9.05			
1939	-18.41	-14.31	-2.58	-11.72			
1940	-15.35	-9.88	-2.13	-9.12			
1941	-11.99	-9.70	-0.45	-7.38			
1942	-14.30	-5.33	0.56	-6.36			
1943	-15.12	-12.68	-3.67	-10.49			
1944	-17.11	-11.32	-2.22	-10.22			
1945	-14.27	-5.52	0.15	-6.54			
1946	-19.00	-5.71	-1.71	-8.81			
1947	-11.97	-7.56	-6.08	-8.54			

Ex₁ : La variabilité inter mensuelle sur 30 ans (section Nord)

1-Nous calculions la moyenne des températures moyennes annuelles de 1916 à 1945 inclusivement; ensuite de 1917 à 1946 inclusivement; ainsi de suite pour obtenir la moyenne mobile 30 ans;

2-Nous calculions l'écart entre chacune des années du mois de janvier par exemple à la moyenne mobile obtenue pour chaque bloc de 30 ans (1916 –1945; 1917-1946, ...) $(Xi - \bar{X})$.

Nous répétions la même procédure pour le mois de février, mars, etc.;

3-L'écart de chacune des valeurs mensuelles à la moyenne mobile était ensuite mis au carré $(Xi - \bar{X})^2$;

4-La somme des carrés des écarts à la moyenne mobile $\sum_i (Xi - \bar{X})^2$ était divisée par le nombre d'éléments (30 ans-1=29). Nous obtenions finalement l'écart-type inter mensuel en faisant la racine carrée de cette dernière valeur (équation p.49).

Ex₂ : La variabilité inter annuelle sur 30 ans (section Nord)

1-Nous calculions la moyenne des températures moyennes annuelles de 1916 à 1945 inclusivement; ensuite de 1917 à 1946 inclusivement; ainsi de suite pour obtenir la moyenne mobile 30 ans;

2-Nous calculions l'écart entre chacune des températures moyennes annuelles comprises à l'intérieure de la période de 30 ans et la moyenne mobile 30 ans $(Xi - \bar{X})$;

3-L'écart de chacune des températures moyennes annuelles à la moyenne mobile était mis au carré $(Xi - \bar{X})^2$;

4-La somme des carrés des écarts à la moyenne mobile $\sum_i (Xi - \bar{X})^2$ était divisée par le nombre d'éléments (30 ans, donc 30 valeurs –1 = 29 valeurs) . L'écart-type inter annuel

s'obtient en faisant la racine carrée de la valeur obtenue telle que décrit dans l'équation ci-dessous.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

(Baillargeon, 1984, p.42)

APPENDICE B

FIGURE ET TABLEAU COMPLÉMENTAIRES

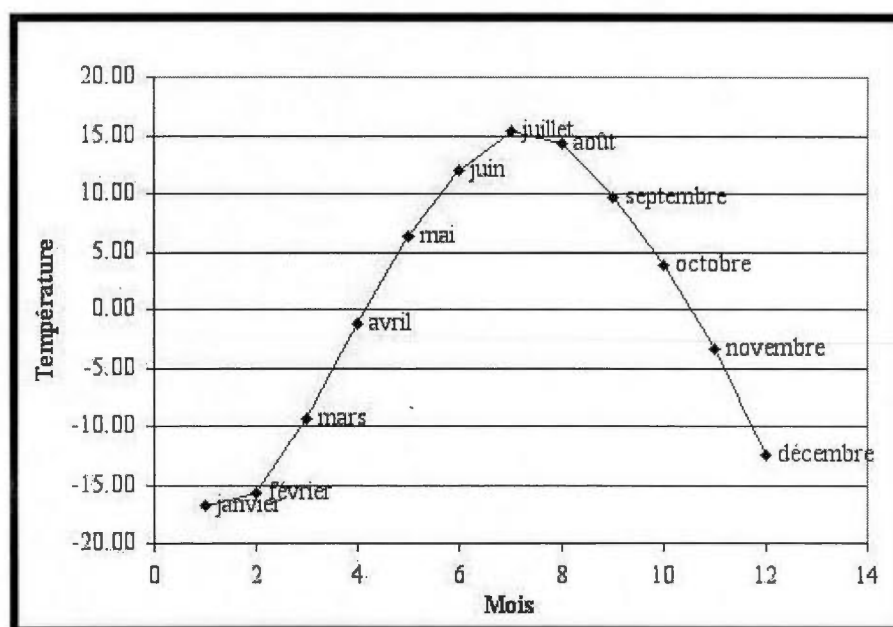


Figure B.1 Températures moyennes mensuelles de la province de Québec, de 1916 à 1995

Tableau B.2 Statistiques des températures moyennes des 22 stations à chacun des mois de l'année, couvrant la période 1916 à 1995 (80 ans)

	Déc- Janv	Jan- Fév	Fév- Mar	Mar- Avl	Avl- Mai	Mai- Juin	Juin- Juil	Juil- Août	Août Sept	Sept- Oct	Oct- Nov	Nov- Déc
Moy mens 1916-1995	-16,72	-15,76	-9,36	-1,18	6,27	12,07	15,33	14,27	9,65	3,82	-3,43	-12,44
Hausse et Baisse	-4,28	0,97	6,39	8,18	7,45	5,80	3,26	-1,06	-4,62	-5,83	-7,26	-9,01
Moy cent	0,21											
É-t mens 1916-1995	2,29	2,66	2,48	1,63	1,26	1,05	0,93	1,02	1,02	1,38	1,71	2,47
É-t im 1916-1995	1,66											

Moy mens: Moyenne mensuelle; Moy cent: Moyenne centennale; É-t mens: Écart-type mensuel; É-t im: Écart-type inter mensuel 80 ans. Dans l'entête, les abréviations des mois inscrit en caractères gras représentent les mois pour lesquels les températures "moy mens 1916-1995" et l'"É-t mens 1916-1995" ont été calculé. Les abréviations des mois inscrit juste au dessus sont utiles pour représenter les hausses et les baisses de la température d'un mois à l'autre.